



Institut für
Maschinelle Anlagentechnik
und Betriebsfestigkeit

Innovationen der
Fabrikplanung und -organisation
Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Band 39

Verena Ritz

**Entwicklung einer numerischen
Simulationsmethode zur digitalen
Abbildung des automobilen
Decklackierprozesses**

Entwicklung einer numerischen Simulationsmethode zur
digitalen Abbildung des automobilen Decklackierprozesses

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
DIPL.-ING. VERENA RITZ
aus Bocholt

genehmigt von der Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung:
13. März 2018

DEKAN

Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling

VORSITZENDER DER PROMOTIONSKOMMISSION

Prof. Dr.-Ing. Norbert Müller

BETREUER

Prof. Dr.-Ing. Uwe Bracht

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Karl Roll

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Innovationen der Fabrikplanung und -organisation

Band 39

Verena Ritz

**Entwicklung einer numerischen
Simulationsmethode zur digitalen Abbildung
des automobilen Decklackierprozesses**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6067-6

ISSN 1615-5211

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Nur die erfolgreiche Gestaltung und Weiterentwicklung industrieller Wertschöpfung kann auf Dauer unseren Lebensstandard und die Errungenschaften der sozialen Marktwirtschaft absichern. Die Produktion bildet nach wie vor das Rückgrat einer modernen, im globalen Wettbewerb stehenden Industrie-, Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft. Umfassendes Wissen und stetig neue Erkenntnisse auf den Gebieten der Fabrikplanung und Produktionsorganisation sind existentiell notwendig.

Die unternehmerische Bedeutung der Produktionsplanung ist im gleichen Maße gestiegen, wie sich die Innovationszyklen von Produkten, Fertigungs- und Logistiksystemen sowie der Arbeitsorganisation verkürzt haben. Um die vorhandene Marktposition zu festigen oder um Wettbewerbsvorteile zu erlangen, muss jede Unternehmensleitung neben dem Produkt und der Technologie auch die Produktionsstrukturen ständig analysieren, sie rechtzeitig an die zu erwartenden Marktentwicklungen anpassen und gegebenenfalls erneuern.

Die erhöhten Ansprüche an die Gestaltung und Wandlungsfähigkeit von Produktionsstrukturen im turbulenten Umfeld erfordern ein effizientes Projektmanagement und eine durchgehende rechnergestützte Planungsunterstützung. In der vorliegenden Reihe – Innovationen der Fabrikplanung und -organisation – sollen neue Methoden und Instrumente zur Planung und Optimierung von Produktionssystemen und -abläufen einer breiten Leserschaft in verständlicher Form vorgestellt werden. Es sind Forschungsergebnisse die häufig in enger Zusammenarbeit mit der Industrie am Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der Technischen Universität Clausthal im Bereich Anlagenprojektierung und Materialflusslogistik entstanden sind.

Ein gemeinsamer systemtechnischer Ansatz kennzeichnet die Fachgebiete Anlagenplanung und Logistik, deren technische, informationstechnische, organisatorische und wirtschaftliche Fragestellungen ganzheitlich und zukunftsweisend zu beantworten sind. Die angestrebten Lösungsstrategien sind im Rahmen des gesamten Produkt- und Produktionsentstehungsprozesses zu sehen und beinhalten sowohl eine theoretische, planerische und simulierende Seite als auch die konkrete Ausgestaltung von Prozessketten, Organisationsformen und Abläufen.

In der Vergangenheit wurden Produktionsstrategien, Programme und Teillebedarfe nicht selten aufgrund persönlicher Einschätzung und Erfahrung festgelegt. Heute sind mit Hilfe mathematischer, wissensbasierter Modelle hinreichende Prognosen und Szenarien zu entwickeln und das Komplexitätsmanagement muss bereits bei der Entwicklung variantenreicher Serienprodukte einsetzen. So können z.B. Agentensysteme schon vorausschauend bei der Analyse von Verbindungen möglicher Module helfen.

Früher wurden die darauf aufbauenden Produktionsstrukturen in der Regel nur statisch geplant und für dynamische Betrachtungen allenfalls Mittelwerte herangezogen. Um in Zukunft falsche oder überhöhte Investitionen und unnötige Folgekosten zu vermeiden, sind bestehende und zu planende Anlagen umfassend dynamisch zu analysieren und optimieren. Mit dem inzwischen zur Realität gewordenen ganzheitlichen Ansatz der Digitalen Fabrik kann jetzt – auf Basis eines umfassenden integrierten Datenmanagements durch rechnergestützte Einzelmethoden bis hin zur Virtuellen Realität – der Planungsprozess entscheidend beschleunigt und verbessert sowie die Planungsqualität und -sicherheit erheblich erhöht werden.

Nicht zuletzt gilt es, die in den Produktions- und Logistiksystemen arbeitenden Menschen wieder stärker in den Mittelpunkt zu stellen, ihre Bedürfnisse zu respektieren und ihnen genügend Raum für Engagement und Verantwortung mit effizienten Formen der Arbeitsorganisation zu geben, die Verschwendung vermeiden und eine stetige Steigerung des Produktionsflusses ermöglichen.

VORWORT DER VERFASSERIN

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorandin im Team Prozess-Simulation der Daimler AG in Sindelfingen.

Ich danke Herrn Professor Uwe Bracht, Leiter des Instituts für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der TU Clausthal, für die wissenschaftliche Betreuung und Unterstützung meiner Arbeit. Für die Übernahme der Mitberichterstattung bedanke ich mich herzlich bei Herrn Professor Karl Roll und Herrn Professor Wolfram Volk.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Oliver Kurz, Leiter des Teams für Prozess-Simulation, für die Unterstützung meiner Arbeit auch über die Zeit meiner Beschäftigung als Doktorandin im Team hinaus. Ich freue mich, dass ich ein Teil eines besonderen Teams sein konnte, das sich vor allem durch Kollegialität und viel Humor auszeichnet. Vielen Dank an all die Kollegen, deren Verdienst es war, dass ich jeden Tag gern ins Büro gekommen bin – auch in den wohl für eine Doktorarbeit typischen schwierigeren Zeiten. Für die fachlichen (und außerfachlichen) Diskussionen danke ich insbesondere Herrn Jochen Rathfelder und Herrn Dr. Sebastian Roller.

Meinen Freunden danke ich für das Mit-Freuen, das Mit-Leiden und das ständige Ermutigen. Besonderer Dank gebührt dabei Dr. Antje Muntzinger auch für die schnellen und messerscharfen Korrekturen meiner Arbeit, Anke Beckmann, Dr. Johannes Eckstein, Stefan Hartweg, Melanie Quéré, Dr. Christian Kästle, Christoph Kaiser, Florian Fink, Dr. Margaret Spies, Dr. Bernhard Spies, Nora zur Nieden, meinem Bruder Simon und natürlich meinem Freund Julius Klinger.

Der größte Dank gilt meinen Eltern. Mit ihrer uneingeschränkten Unterstützung haben sie Bildung auf höchstem Niveau stets wie eine Selbstverständlichkeit für mich erscheinen lassen. Sie tragen den größten Verdienst an dieser Arbeit und sie sei ihnen gewidmet.

... τὸ εὐδαιμον τὸ ἐλεύθερον, τὸ δ' ἐλεύθερον τὸ εὐψυχον ...
das Geheimnis des Glücks liegt in der Freiheit, das der Freiheit aber im Mut
(frei übersetzt)

Perikles (494 – 429 v. Chr.)

KURZFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wird eine numerische Simulationemethode entwickelt, um einen automobilen Decklackierprozess digital abzubilden und zu optimieren. Dabei wird nicht nur die Beschichtung einfacher Geometrien oder einzelner Bauteile untersucht. Die simulative Betrachtung erstreckt sich erstmalig auf eine komplette Fahrzeugkarosserie im Umfeld der Decklackierkabine und umfasst reale Prozesseinstellungen und Roboterbewegungspfade.

Das System wird über einen Euler-Lagrange Ansatz für Mehrphasenströmungen abgebildet und mit Hilfe eines kommerziellen CFD (Computational Fluid Dynamics) Software-Pakets gelöst. Die entwickelte Methode gliedert sich in einzelne Teilschritte, deren Komplexität sukzessive zunimmt. Die Idee dieser Vorgehensweise ist es, in Vorabsimulationen Eingangsdaten für den letzten Teilschritt zu generieren, welcher die Simulation der gesamten Decklackierkabine darstellt. Dadurch erst kann der hochkomplexe Decklackiervorgang unter sinnvollem Rechenaufwand abgebildet werden.

Bei der Modellierung wird auch der elektrostatisch unterstützte Lackiervorgang berücksichtigt. Auf Basis geeigneter Gleichungen aus der Literatur wird ein Modell gebildet, das die zeitabhängige Aufladung der Lackpartikel in der Umgebung einer Koronaentladung wiedergibt. Über einen Abgleich mit Technikumsversuchen werden die entwickelten Ansätze validiert. Die Bewertung erfolgt anhand der berechneten und gemessenen Schichtdickenverteilungen des Lacks an der Oberfläche.

Ziel der Arbeit ist es einerseits, zum generellen Verständnis des Decklackierprozesses beizutragen, das auf Grund der zahlreichen parallel ablaufenden Teilprozesse erschwert ist. In der Simulation können die Teilprozesse detailliert betrachtet und ihre Auswirkungen auf das integrale Prozessgeschehen untersucht werden.

Andererseits wird in der Arbeit ein digitales Analysewerkzeug entwickelt, durch dessen Anwendung Entwicklungs- und Produktionsprozesse unterstützt werden können. Da für das Aufsetzen der Simulation lediglich ein digitales Datenmodell des Fahrzeugs sowie die Bewegungsbahnen der Roboter benötigt werden, kann dies in einer sehr frühen Phase geschehen. Mit Hilfe der Berechnungsergebnisse werden Defizite in Bezug auf Prozessabläufe oder Prozesseinstellungen identifiziert. Optimierungspotentiale können generiert und digital bewertet werden, bevor sie in den realen Prozess einfließen. Auf Basis der Simulationsergebnisse werden für den Prozessschritt der Außenlackierung eine digitale Prozessanalyse durchgeführt und darin die Potentiale der Methode aufgezeigt.

INHALT

KURZFASSUNG	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XIII
TABELLENVERZEICHNIS	XVII
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 Aufbau der Arbeit	6
1.2 Eigene Vorgehensweise und Aufbau der Simulationsmethode	6
2 LACKIERPROZESSE IM FAHRZEUGBAU	9
2.1 Prozessschritte	9
2.2 Decklackierung	12
2.2.1 Funktionsprinzip der Hochrotationszerstäubung	15
2.2.2 ESTA	18
2.2.3 Auftragswirkungsgrad	20
2.2.4 Messverfahren	21
3 NUMERISCHE SIMULATION DER DECKLACKAPPLIKATION	25
3.1 Stand der Technik	25
3.2 Zielsetzung der Arbeit	29
3.3 Grundlagen der Strömungslehre	31
3.4 Modellierung der Partikelladung	37
3.5 Numerische Verfahren und eingesetzte Software	39

4	NUMERISCHE SIMULATION DES STRÖMUNGSFELDS	41
4.1	Segmentmodell	43
4.1.1	Vernetzung des Segmentmodells	44
4.2	Vollmodell	46
4.2.1	Vernetzung des Vollmodells	46
4.3	Simulationsergebnisse der Strömungsfeldberechnung	47
5	TECHNIKUMSVERSUCHE	55
5.1	Versuchsaufbau im Technikum	57
5.1.1	Schichtdickenmessungen	58
5.1.2	Tropfengrößenmessungen	58
5.1.3	Ermitteln des Festkörpergehalts	60
5.1.4	Bestimmung des Auftragswirkungsgrads über Wiegen	60
6	NUMERISCHE SIMULATION DES TECHNIKUMSVERSUCHS	63
6.1	Geometrisches Modell und Vernetzung	63
6.2	Physikalische Modellierung	66
6.3	Diskussion der Ergebnisse	69
6.3.1	Bewertung des Segment- und Vollmodells als Basis für die Ebene-Blech-Berechnung	70
6.3.2	Auswertung Ergebnisse Brush B1 – ohne Hochspannung	71
6.3.3	Auswertung Ergebnisse Brush B2 – ohne Hochspannung	74
6.3.4	Auswertung Ergebnisse Brush B3 – ohne Hochspannung	75
6.3.5	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse am ebe- nen Blech ohne Hochspannung	77
6.3.6	Auswertung Ergebnisse Brush B1 – mit Hochspannung	78
6.3.7	Auswertung Ergebnisse Brush B2 – mit Hochspannung	81
6.3.8	Auswertung Ergebnisse Brush B3 – mit Hochspannung	83
6.3.9	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse am ebe- nen Blech mit Hochspannung	85
7	NUMERISCHE SIMULATION DER DECKLACKIERKABINE	87
7.1	Geometrisches Modell, Vernetzung und Simulationsablauf . . .	89
7.2	Diskussion der Ergebnisse	93
7.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	101

8	KRITISCHE REFLEXION	103
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	107
9.1	Zusammenfassung	107
9.2	Ausblick	109
	LITERATURVERZEICHNIS	113

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1	Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik nach VDI 4499 Blatt 1:2008-02 (2008)	2
1.2	Ablauf der Methodenentwicklung	5
1.3	Ablauf der Simulationsmethode	8
2.1	Lacksystem des konventionellen (links) und des integrierten Prozesses (rechts) mit typischen Schichtdicken der einzelnen Lackschichten	10
2.2	Kathodische Tauchlackierung einer Rohbaukarosserie (Quelle: Daimler AG)	11
2.3	Prozessabfolge und Zerstäuber in der Decklackierung; oben: Basislack, unten: Klarlack	13
2.4	Aufnahmen der Tropfenbildung (Quelle: Daimler AG)	16
2.5	CAD Geometrie des Zerstäubers aus der BC1 Außenlackierung	16
2.6	Schematische Darstellung des Lenkluftrings und der Lenkluftbohrungen	17
2.7	Schematischer Aufbau eines Laserbeugungsspektrometers (nach ISO 13320:2009-12)	22
2.8	Schematische Darstellung des magnetinduktiven Messverfahrens (nach DIN EN ISO 2178:2016-11)	23
3.1	Zwei-Wege-Kopplung (nach CROWE u. a. [1998])	36
4.1	Anordnung des Interfaces	41
4.2	Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten am Lenklufteintritt und am Interface	42

4.3	12° Segment des Glockentellers	43
4.4	Getrimmtes Netz des Segmentmodells mit Verfeinerungen . . .	45
4.5	Getrimmtes Netz des Vollmodells mit Verfeinerungen	47
4.6	Vergleich der Druckfelder beim Segmentmodell (A) oben und Vollmodell (B) unten, sowie die jeweilige Vernetzung am Luftauslass bei einer Lenkluftmenge von $350 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$	48
4.7	oben: Simulationsergebnisse der Strömungsfeldberechnung mit Segmentmodell (A) und Vollmodell (B) unten: Geschwindigkeitsverteilung am Interface mit Segmentmodell (A) und Vollmodell (B)	50
4.8	Vektorielle Ansicht des Strömungsfelds bei einer Lenkluftmenge von $350 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ im Vollmodell	52
4.9	Simulationsergebnisse der Druckfelder für das Segmentmodell (A) und das Vollmodell (B) bei unterschiedlichen Lenklufteinstellungen	53
5.1	Die drei exemplarischen Brushes innerhalb der BC1 Außenlackierungs-Brushmatrix	56
5.2	Aufbau der Tropfengrößenmessung	59
5.3	Tropfengrößenverteilungen für Brushes B1, B2 und B3	60
6.1	Geometrisches Modell des Technikumversuchs	64
6.2	Overset-Region	65
6.3	Verteilung der 20 Punkte für die Tröpfcheninjektion	67
6.4	Simulierte Schichtdicke am ebenen Blech für Brush B2, Strömung auf Basis des Segmentmodells (links) und des Vollmodells (rechts)	70
6.5	Brush B1 – Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts)	72
6.6	Brush B1 – Profilschnitte von Simulation und Messung im Vergleich	73
6.7	Brush B2 – Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts)	74
6.8	Brush B2 – Profilschnitte von Simulation und Messung im Vergleich	75
6.9	Brush B3 – Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts)	76

6.10	Brush B3 – Profilschnitte von Simulation und Messung im Vergleich	76
6.11	Darstellung des elektrischen Potentials der Vorabsimulation in der Schnittansicht	78
6.12	Elektrisches Potential am Interface	79
6.13	Brush B1 mit Hochspannung – Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts)	80
6.14	Brush B1 mit Hochspannung – Profilschnitte von Simulation und Messung im Vergleich	80
6.15	Brush B2 mit Hochspannung – Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts)	82
6.16	Brush B2 mit Hochspannung – Profilschnitte von Simulation und Messung im Vergleich	82
6.17	Brush B3 mit Hochspannung – Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts)	84
6.18	Brush B3 mit Hochspannung – Profilschnitte von Simulation und Messung im Vergleich	85
7.1	Roboterbahnen für die Außenlackierung – Zone 1 oben, Zone 2 unten. Die unterschiedlichen Farben symbolisieren die zum Einsatz kommenden Roboter.	88
7.2	Zeitliche Abfolge des Lackierprogramms – Zone 1 oben, Zone 2 unten	89
7.3	Verfeinerte Netzbereiche für die Zerstäuberbewegung an der Fahrertür	90
7.4	Zellwachstum im Hintergrundnetz	91
7.5	Momentaufnahme Lackiersimulation in Zone 1	92
7.6	Einfärbung der Bereiche oberhalb von 12 μm	94
7.7	Einfärbung der Bereiche oberhalb von 17 μm	95
7.8	Schichtdickenverteilung auf der Heckklappe	95
7.9	Elektrische Feldstärke im Bereich der Heckklappe	96
7.10	Vektorielle Darstellung der Zerstäuberströmung auf Höhe der Heckklappe	97

7.11 Vektorielle Ansicht des Strömungsfeldes in den Momenten der Begegnung	99
7.12 Schnitt durch das Strömungsfeld zum Zeitpunkt (IV) der Be- gegnung	100
7.13 Schichtdickenverteilung auf dem Dach	100

TABELLENVERZEICHNIS

5.1	Brusheinstellungen für die drei exemplarischen Brushes	57
6.1	Vergleich Auftragswirkungsgrad der Beschichtung, Strömung auf Basis des Segmentmodells bzw. Vollmodells	71
6.2	Brush B1 – Auftragswirkungsgrade der Simulation und der Messung	73
6.3	Brush B2 – Auftragswirkungsgrade der Simulation und der Messung	75
6.4	Brush B3 – Auftragswirkungsgrade der Simulation und der Messung	77
6.5	Brush B1 mit Hochspannung – Auftragswirkungsgrade der Si- mulation und der Messung	81
6.6	Brush B2 mit Hochspannung – Auftragswirkungsgrade der Si- mulation und der Messung	83
6.7	Brush B3 mit Hochspannung – Auftragswirkungsgrade der Si- mulation und der Messung	85

1

EINFÜHRUNG

Die stark zunehmende Digitalisierung, die jeder persönlich im Alltag erfahren kann, birgt auch für industrielle Entwicklungen und Prozesse neue Potentiale. Wir bewegen uns in einem Umfeld, in dem wir zu jeden Zeitpunkt vernetzt sind und einen ständigen Zugriff auf eine große Menge von Daten haben. Taktraten, Speicherkapazitäten und Datenübertragungsraten werden immer leistungstärker.

Das Konzept der Digitalen Fabrik hat diese Potentiale schon früh für den industriellen Einsatz erkannt. In Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Effizienz gewinnt eine durchgängige, computerunterstützte Produkt- und Prozessentwicklung immer mehr an Bedeutung.

Die Digitale Fabrik umfasst dabei nicht nur das digitale Abbild der Fabrik, sondern auch das der Produktionsanlagen, der Produktionsprozesse und des Produkts. Der Begriff wird vom Verein Deutscher Ingenieure in VDI 4499 Blatt 1:2008-02 (2008) wie folgt definiert:

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung – die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“

Einen Überblick über die Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik liefert Abbildung 1.1. Demnach gehören zu den Themen der Digitalen Fabrik nicht nur die Entwicklung und Produktionsplanung sondern auch der Betrieb des

Produktes. In der Digitalen Fabrik wird also ein Großteil des Produktlebenszyklus begleitet. Weiterführende Informationen zum Thema Digitale Fabrik finden sich bei BRACHT u. a. (2011) und WESTKÄMPER u. a. (2013)

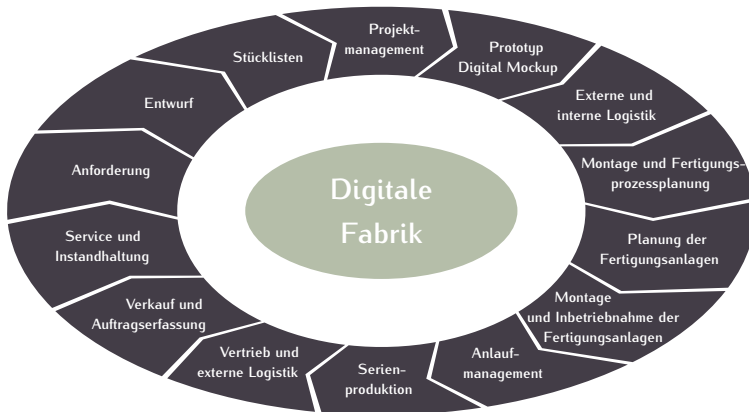


ABBILDUNG 1.1: Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik nach VDI 4499 Blatt 1:2008-02 (2008)

Der automobile Fertigungsprozess kann unterteilt werden in die Schritte Presswerk, Rohbau, Lackierung und Montage. Im Presswerk entstehen die Einzelteile der Rohbaukarosserie durch Umformung von Blechen. Diese werden anschließend im Rohbau zu einer Karosserie zusammengefügt. Dabei kommen je nach Bauteil und Material unterschiedliche Fügeverfahren zum Einsatz. Nach der Reinigung wird die Oberfläche mit verschiedenen Lackschichten versehen. In der Montage wird aus der Rohbaukarosserie das vollständige Fahrzeug. In diesem Schritt findet neben dem Anbringen des Interieurs und verschiedener Anbauteile auch die sogenannte Hochzeit statt, das Verbinden der Karosserie mit Motor und Antriebsstrang.

Die numerische Berechnung der einzelnen Schritte der automobilen Fertigungsprozesskette stehen mehr und mehr im Fokus der Forschung. Dabei geht die Prozesssimulation von Umformprozessen bereits sehr weit zurück (vgl. ROLL und TEKKAYA [1985][1]; ROLL und TEKKAYA [1985][2]; LANGE u. a. [1993];

LANGE [2003]). Bei der digitalen Abbildung der Blechumformung im Presswerk stehen vor allem die Fragestellungen nach der generellen Herstellbarkeit eines Bauteils im Vordergrund sowie das Vorhersagen von Materialversagen und die Maßhaltigkeit der Bauteile (vgl. ROHLER [2002]; SCHMIDT-JÜRGENSEN [2003]; ROLL u. a. [2005]; BANABIC [2010]). Für die Berechnungen kommt üblicherweise die Finite-Elemente-Methode (FEM) zum Einsatz.

Die simulative Untersuchung von Fügeprozessen im Rohbau konzentriert sich sowohl auf die Verfahrensabläufe auf mikroskopischer Ebene als auch in neueren Untersuchungen auf die Maßhaltigkeit von gefügten Bauteilgruppen. Arbeiten, die sich mit diesem Themengebiet beschäftigen, sind SCHWENK (2007), ECKERT (2012), PERRET (2013) und KÄSTLE (2016).

Eine Methode zur numerischen Simulation der kathodischen Tauchlackierung (KTL) sowie des anschließenden Trocknungsprozesses im Konvektionstrockner wird von ROLLER vorgestellt (vgl. ROLLER [2012]). In ALBIEZ (2016) wird das Deformationsverhalten von Automobilkarosserien während des Lacktrocknungsprozesses simulativ und experimentell untersucht.

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung einer Simulationsmethode vorgestellt, um einen automobilen Decklackierprozess zu analysieren und zu optimieren. Erstmals wird die digitale Abbildung einer gesamten Decklackierkabine und damit der Lackierprozess an einer Fahrzeugrohbaucarosserie untersucht. BRACHT u. a. (2011) sehen die Simulation als eines der wichtigsten Instrumente der Digitalen Fabrik. Mit Hilfe qualifizierter Berechnungen ist es möglich, den Prozess noch vor dem ersten Prototypen digital zu untersuchen und in enger Zusammenarbeit mit dem Gewerk der Lackierung eventuell auftretende Probleme zu identifizieren. Dabei kann die Simulation sowohl die Entwicklungs- als auch die Produktionsprozesse unterstützen. Da lediglich die Oberflächengeometriedaten des Fahrzeugs benötigt werden, können bereits in der Designphase der Fahrzeugentwicklung Aussagen über die Lackierbarkeit der Oberfläche getroffen werden. Werden während des Produktionsanlaufs Probleme erkannt, können Lösungen untersucht und bewertet werden. Dies ermöglicht es, Hardware und Ressourcen einzusparen und Produktentwicklungszeiten zu verkürzen. Die hier vorgestellte Simulationsmethode befindet sich bereits im Einsatz, um gemeinsam mit den Prozessverantwortlichen der

Lackierung die im Verlauf der Arbeit beschriebenen Möglichkeiten der Prozessoptimierung auszuarbeiten.

Der Begriff der Simulation ist seinerseits sehr umfassend und bedarf einer genauen Definition. In Abgrenzung zu realen Versuchen oder Experimenten, die zum Teil ebenfalls als Simulation bezeichnet werden, sollen hier lediglich Computersimulationen im Fokus stehen. Ein Überblick über unterschiedliche Simulationsmethoden im Zusammenhang mit der Digitalen Fabrik findet sich bei BRACHT u. a. (2011). Die Simulation ist ein Analysewerkzeug, mit dem ein Abbild eines realen Systems oder Prozesses geschaffen wird, mit dem Ziel, dieses zu verstehen, zu optimieren oder Vorhersagen zu treffen. Einer Simulation geht stets die Modellbildung voraus.

„Für einen Beobachter B ist ein Objekt A^* ein Modell des Objekts A, um unter Verwendung von A^* Fragestellungen, die B zu A interessieren, beantworten zu können.“ (nach MINSKY (1965))

Mit Hilfe des Modells wird also die Realität so weit wie nötig abstrahiert, dass sie über Gesetzmäßigkeiten oder Zustände beschrieben werden kann. Die Qualität des Modells wirkt sich entscheidend auf die Aussagekraft der späteren Simulationsergebnisse aus. Allerdings sind bei der Modellbildung bzw. Modellentwicklung stets Aufwand und Nutzen gegeneinander abzuwägen, um ein System mit vertretbarem Berechnungsaufwand aufzustellen. Der Berechnungsingenieur sollte einen gewissen Erwartungshorizont bezogen auf das spätere Simulationsergebnis besitzen, um ein geeignetes Modell kreieren zu können. Wird ein stark vereinfachendes Modell gewählt, ist die Rechenzeit möglicherweise kurz, das Ergebnis auf Grund der großen Abstraktion aber zu ungenau. Wird ein Modell gewählt, welches das Problem sehr detailgetreu beschreibt, kann der Rechenaufwand schnell ansteigen, ohne dass die Güte der Ergebnisse in Bezug auf die betrachtete Fragestellung zunimmt. Ziel bei der Modellbildung muss es also sein, signifikante Teilprozesse oder Wechselwirkungen in gleichem Maße wie das Potential für Vereinfachungen zu identifizieren. Dabei ist die Modellbildung stets ein iterativer Prozess. Ist die gewünschte Güte der Simulationsergebnisse erreicht, können mit Hilfe der Berechnung Rückschlüsse auf den realen Prozess getroffen und Optimierungen vorgenommen werden. Abbildung 1.2 zeigt das Vorgehen bei der hier vorgestellten Methodenentwicklung.

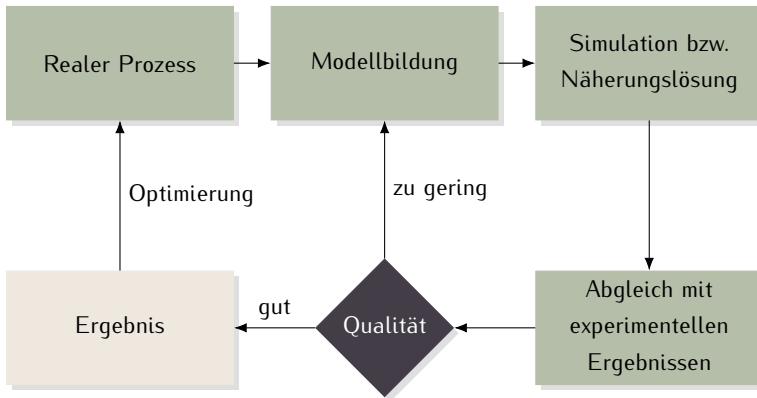


ABBILDUNG 1.2: Ablauf der Methodenentwicklung

Fragestellungen aus der numerischen Strömungsmechanik gehören zu den rechenintensivsten Problemen der Numerik. Dank des Performanceanstiegs moderner Hochleistungsrechner ist es möglich, immer komplexere technische Systeme digital abzubilden und zu simulieren. Der automobiler Lackierprozess stellt ein solch hochkomplexes System dar. Die zahlreichen parallel ablaufenden Teilprozesse erschweren das Prozessverständnis und machen eine genaue Analyse erforderlich. Eine besondere Herausforderung liegt dabei in der skalenübergreifenden Charakteristik des Prozesses. Die Betrachtung umschließt die Lacktropfen mit wenigen Mikrometern Durchmesser, die Luftausströmung der Lenkluft im Bereich von mehreren $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis hin zur Fahrzeugoberfläche in der Größenordnung von mehreren Quadratmetern.

In bisherigen Ansätzen zur Simulation des Decklackierprozesses sind zwar die mathematischen Modelle der ablaufenden physikalischen Prozesse implementiert, doch die Analysen beschränken sich auf einfache Geometrien und häufig stationäre Zerstäuber. Ganzheitlich ist der Prozess noch nicht algorithmisch erfasst. Damit jedoch der Produktentstehungsprozess im Sinne der Digitalen Fabrik durch die Simulation unterstützt werden kann, ist eine möglichst umfassende Prozessbetrachtung notwendig und das Ziel dieser Arbeit, die wie folgt gegliedert ist.

1.1 AUFBAU DER ARBEIT

Die Arbeit ist untergliedert in sieben Hauptabschnitte.

Im ersten Kapitel wird eine Einführung in das Thema gegeben und die Kernfragestellung der Arbeit in Bezug zu bereits vorhandenen Simulationsmethoden der digitalen Fertigungsprozesskette gesetzt. Die eigene Vorgehensweise bei der Entwicklung der Methode und ihr Aufbau werden in einem Unterabschnitt dargelegt.

In Kapitel 2 werden die einzelnen Prozessschritte eines automobilen Lackierprozesses vorgestellt. Der in der Arbeit simulierte Schritt der Decklackierung wird in Abschnitt 2.2 detailliert dargelegt. Zusätzlich werden die physikalischen Mechanismen des Prozesses sowie entscheidende Begrifflichkeiten im Zusammenhang mit der Decklackierung erläutert.

Eine Auseinandersetzung mit bisherigen Entwicklungen zum Thema numerische Simulation der Decklackapplikation befindet sich in Kapitel 3. Anhand dieser Beiträge wird das bestehende Forschungsdefizit herausgearbeitet, aus dem sich die Zielsetzung dieser Arbeit ergibt. Außerdem beinhaltet dieses Kapitel die Grundlagen der Strömungslehre, auf denen das Modell aufbaut, mit den zum Einsatz kommenden mathematischen Modellgleichungen und der verwendeten Simulationssoftware.

Die Entwicklung der eigenen Simulationsmethode wird in den Kapiteln 4 bis 7 vorgestellt.

Die Arbeit schließt mit einer kritischen Gesamtreflexion in Kapitel 8 sowie einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 9.

1.2 EIGENE VORGEHENSWEISE UND AUFBAU DER SIMULATIONSMETHODE

Die hohe Komplexität des Sprühlackiervorgangs stellt eine große Herausforderung für die digitale Abbildung desselben dar. Die Schwierigkeit liegt an der Interaktion der vielen beteiligten Prozesse, deren Modellierung auch isoliert betrachtet schon diffizil sein kann. Bei der Modellbildung ist abzuwägen, welche der ablaufenden physikalischen Teilprozesse den Gesamtprozess dominieren und deshalb in hohem Detail abgebildet werden sollten. An anderer Stelle ist zu entscheiden, ob unter akzeptablen Genauigkeitsverlusten

bestimmte Annahmen oder Vereinfachungen die Modellkomplexität reduzieren können.

Neben der physikalischen Modellierung bringt auch die geometrische Modellierung auf Grund der skalenübergreifenden Prozesscharakteristik Schwierigkeiten mit sich. Ziel der Arbeit ist es, den Decklackierprozess innerhalb einer automobilen Lackierkabine möglichst ganzheitlich digital abzubilden. Das bedeutet, dass das Rechengebiet die Dimensionen einer Lackierkabine mit Fahrzeugkarosserie umfassen muss. Gleichzeitig aber sind beispielsweise die hohen Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der feinen Lenkluftbohrungen zeitlich und geometrisch aufzulösen.

Die beschriebenen Anforderungen sowohl an die physikalische als auch die geometrische Modellierung resultieren in einem enormen Rechenbedarf. Dies dürfte die Hauptursache sein, weshalb bisherige Simulationsansätze des automobilen Decklackierprozesses keine vollständige Lackierkabine abzubilden vermochten. Um dieses Ziel dennoch zu erreichen, wird in der vorliegenden Arbeit eine Simulationsmethode entwickelt, die sich aus aufeinander aufbauenden Teilsimulationen zusammensetzt. Diagramm 1.3 veranschaulicht die Vorgehensweise.

Sie ist gegliedert in drei Abschnitte. Von einem Schritt zum nächsten wird das betrachtete System erweitert und die Modellkomplexität nimmt zu. Für die Berechnung eines vollständigen Decklackierprozesses werden alle Abschnitte sukzessive durchlaufen.

Im ersten Schritt wird zunächst das reine Strömungsfeld mit einer hohen Detailgenauigkeit berechnet (vgl. Kapitel 4). Das Rechengebiet besteht dabei aus dem Zerstäuber und seiner unmittelbaren Umgebung. Durch Ausnutzung von Symmetrien kann eine hochaufgelöste geometrische Diskretisierung gewählt werden, die für die kleinen Bohrungsdurchmesser der Lenkluft und ihre hohen Strömungsgeschwindigkeiten benötigt wird.

Die aus der Simulation ermittelten Informationen des Strömungsfelds werden dann als Randbedingung in die Berechnung des sogenannten Ebenen-Blech-Modells eingebracht (vgl. Kapitel 6). Ein Interface ersetzt dabei die fein aufgelösten Bereiche aus dem Schritt zuvor und ermöglicht eine Einsparung von Rechenzeit. Beim Ebenen-Blech-Modell handelt es sich um die digitale Abbildung eines realen Laborversuchs (vgl. Kapitel 5). Dies ermög-

licht eine Validierung anhand von Messungen, sodass gegebenenfalls eine Modellanpassung durchgeführt werden kann.

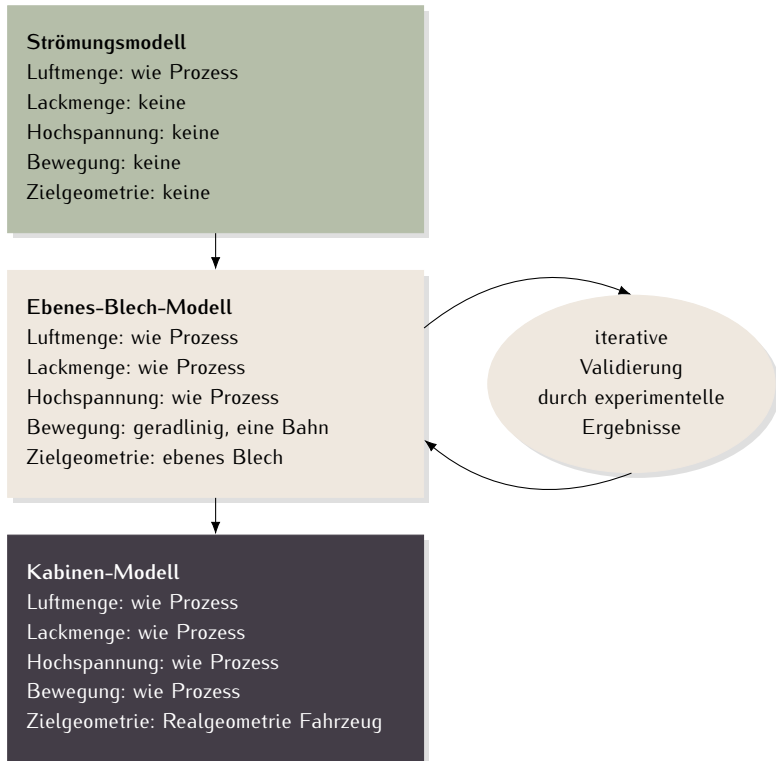


ABBILDUNG 1.3: Ablauf der Simulationsmethode

Im letzten Schritt bündeln sich die gewonnenen Informationen aus den Schritten zuvor. Er stellt die Abbildung des realen Lackierprozesses am Fahrzeug dar (vgl. Kapitel 7). Die gesamte Methode wird am Beispiel der Außenlackierung der ersten Wasserbasislackschicht (BC1 außen) demonstriert und bewertet.

2

LACKIERPROZESSE IM FAHRZEUGBAU

Die automobilen Serienlackierung schließt sich an den Fahrzeugrohbau an. In mehreren Prozessschritten wird die Fahrzeugoberfläche veredelt. Aufwändige Lacksysteme leisten viel mehr als die bloße Differenzierungsmöglichkeit für den Kunden über die Fahrzeugfarbe. Die einzelnen Lackschichten sorgen für Korrosionsschutz, Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse (z.B. UV-Einstrahlung, Kratzer, Steinschlag) sowie die gewünschte individuelle Optik. Die hochentwickelten Beschichtungsstoffe werden vollautomatisch in hauchdünnen Schichtdicken von wenigen Mikrometern aufgetragen. Dabei kommen unterschiedliche Applikationsverfahren zum Einsatz. Bevor die erste Lackschicht aufgetragen wird, müssen die Karosserien von Schmutz und Ölrückständen aus dem Rohbau gereinigt werden, welche die Lackanhaftung beeinträchtigen könnten. Dies geschieht durch Abspritzen und Tauchbäder. Außerdem wird die Oberfläche in einer Vorbehandlung mit Phosphat optimal auf die weitere Oberflächenbehandlung vorbereitet. Die Phosphatschicht dient als Haftvermittler zwischen dem metallischen Untergrund und der nachfolgenden Beschichtung.

2.1 PROZESSSCHRITTE

Als Beispiel für einen automobilen Lackierprozess wird an dieser Stelle ein integrierter Prozess vorgestellt. Die Innovation bei diesem Prozess ist der Wegfall des Füllerzwischenschrittes. In einem konventionellen Lackierprozess hat der Füller die Aufgabe, die Oberfläche vor Steinschlag und die KTL-Schicht vor UV-Lichteinstrahlung zu schützen, sowie Unebenheiten des Untergrunds auszugleichen. Beim integrierten Prozess werden die Funktionen des Füllers in eine andere Lackschicht integriert. Dadurch können sowohl Füllermaterial,

aber vor allem auch der energieaufwändige Trocknerdurchlauf eingespart werden, der sich an den Füllerauftrag anschließt. Der integrierte Prozess ist eine deutlich ressourcenschonendere und kostengünstigere Prozessvariante. Aus diesem Grund stellen immer mehr Automobilhersteller ihre Anlagen auf den füllerlosen Prozess um (vgl. DÖSSEL [2006]; BMW [2011]; MINKO [2010]).

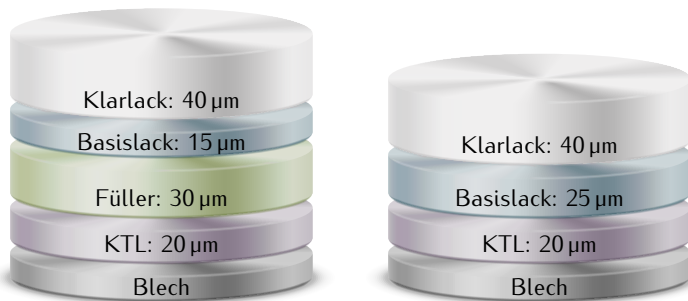


ABBILDUNG 2.1: Lacksystem des konventionellen (links) und des integrierten Prozesses (rechts) mit typischen Schichtdicken der einzelnen Lackschichten

Die erste Lackschicht wird in der kathodischen Tauchlackierung (KTL) aufgetragen. Dabei handelt es sich um ein elektrochemisches Beschichtungsverfahren. Die Rohbaukarosserie wird in ein Becken getaucht, welches mit einem speziellen Kunststofflack gefüllt und mit Anoden versehen ist. Am Fahrzeug, das als Kathode fungiert, scheidet sich während des Tauchprozesses eine Lackschicht ab. Diese Grundierung dient vor allem dem Korrosionsschutz, ferner dem Ausgleichen von Unebenheiten in der Außenhaut der Karosserie. Das Beschichtungsverfahren ist besonders gut für komplexe und verwinkelte Strukturen geeignet, da auch Hohlräume erreicht werden. Außerdem besitzen die Lacke auf Grund ihrer Wasserbasis eine gute Umweltverträglichkeit. Qualitätskriterium für die kathodische Tauchlackierung ist die resultierende Schichtdicke. Im Anschluss an das Tauchbecken wird der Lack in einem Trockner bei hohen Temperaturen ausgehärtet. Für die numerische Simulation sowohl der Elektrotauchlackierung als auch der anschließenden Trocknung existieren qualifizierte Modelle, welche gute Prozessvorhersagen treffen. Beschreibungen finden sich bei KURZ (2006) und ROLLER (2012). Mit Hilfe der

Simulationen können Vorhersagen über die Lackabscheidung getroffen und noch in der Konzeptphase Maßnahmen ergriffen werden.



ABBILDUNG 2.2: Kathodische Tauchlackierung einer Rohbaukarosserie (Quelle: Daimler AG)

Ist der Lack eingebrannt, folgt die Nahtabdichtung (NAD). In diesem Prozessschritt bringen Roboter ein PVC-Material auf Fügestellen und Fugen auf, um sie gegen Korrosion zu versiegeln. Ein weiterer Trockner härtet das Material aus.

In konventionellen Lackierprozessen erfolgt nun der Ausgleich von Oberflächenunebenheiten mit Hilfe eines speziellen Füllmaterials. In dem hier vorgestellten Ablauf entfällt die Füllerschicht. Es wird sofort mit dem Auftrag des Decklacks begonnen. Der Prozessschritt der Decklackierung wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

2.2 DECKLACKIERUNG

Sein individuelles Aussehen erhält das Fahrzeug über den Decklack. Unter dem Begriff versteht man die Kombination aus dem farbgebenden Wasserbasislack (BC – *base coat*) und dem Klarlack (CC – *clear coat*), der das Fahrzeug abschließend versiegelt und für ein glänzendes oder mattes Erscheinungsbild sorgt. Um Verunreinigungen, beispielsweise durch Staub, vermeiden zu können, findet die Decklackierung in abgeschlossenen Reinraumkabinen statt. Die Rohbaukarrosserie wird zunächst in Reinigungsautomaten mit Emu-Federn behandelt, bevor sie über Schleusen in die Spritzkabine befördert wird. Die Umgebungsbedingungen in der Kabine wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit werden ständig überwacht und geregelt, um möglichst konstante Prozessbedingungen zu schaffen. Eine laminare Luftströmung, die Kabinensinklufte, sorgt dafür, dass ein kontinuierlicher Luftstrom von der Decke in Richtung Auswaschung verläuft, sodass kleinste Lackpartikel nicht als Nebel im Raum verbleiben. Ein schnelles Säubern der Kabine ist zudem notwendig, da Fahrzeuge unterschiedlicher Farbe direkt aufeinanderfolgen können und der Prozess nicht ins Stocken geraten darf.

All diese Maßnahmen sind notwendig, da der Decklackierprozess auf Grund vieler beteiligter Teilprozesse sehr komplex und sensibel ist. Störungen des Prozesses können sich empfindlich auf das Lackiererergebnis auswirken. Dem kommt zugute, dass Lackierprozesse einen hohen Automatisierungsgrad besitzen. So ist es möglich, den Prozessraum möglichst frei von äußeren Einflüssen zu halten. Der Lackauftrag erfolgt mit Hilfe von Lackierrobotern, die über mehrere Freiheitsgrade flexibel programmiert werden können und so an die jeweilige Oberflächenkontur angepasst arbeiten. Damit kann dem Problem des Oversprays entgegengewirkt werden. Unter Overspray versteht man den Anteil des Lacks, der die zu beschichtende Oberfläche nicht erreicht. Um eine gegenseitige Störung der eng beieinander arbeitenden Roboter zu vermeiden, müssen die Pfade und Prozessparameter sorgfältig geplant werden. Dies geschieht über eine Offline-Programmierung, bei der die Bahnen und Prozesseinstellungen vorkonfiguriert werden. An der Werkzeugaufnahme der Roboter ist ein Hochrotationszerstäuber montiert, der den Lack in feine Parti-

kel zerstäubt. Eine genauere Beschreibung des Zerstäubungsprozesses findet sich in Kapitel 2.2.1.

Der Auftrag des Wasserbasislackes ist in vier Teilschritte (BC1 innen, BC1 außen, BC2 innen, BC2 außen) unterteilt. Es werden je zwei Schichten im Innenraum und auf der Außenhaut aufgetragen. Abbildung 2.3 verdeutlicht die Prozessabfolge und die zum Einsatz kommenden Zerstäuber.

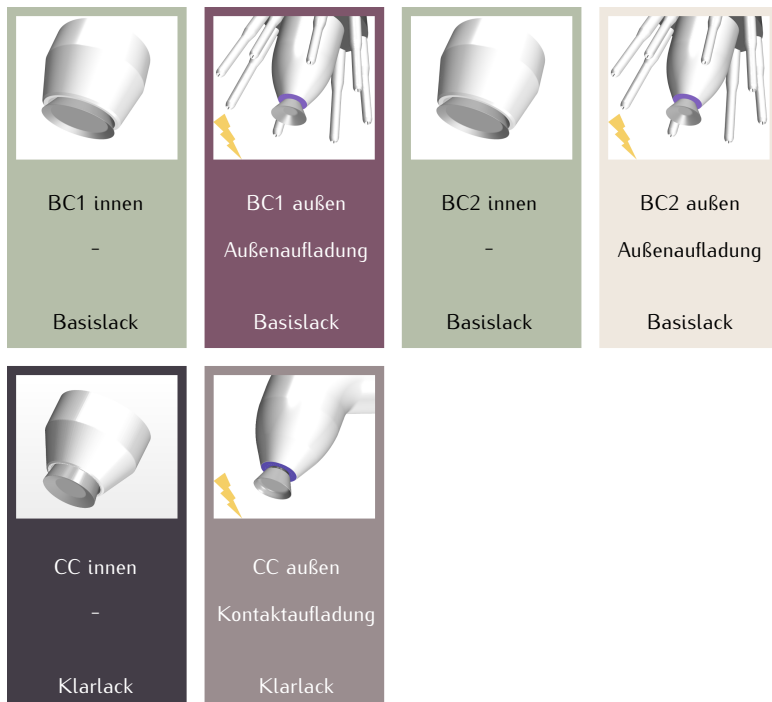


ABBILDUNG 2.3: Prozessabfolge und Zerstäuber in der Decklackierung; oben: Basislack, unten: Klarlack

Zunächst werden die Innenbereiche des Fahrzeugs wie Türinnenseiten und -rahmen, der Motorinnenraum, sowie die Unterseiten der Motorhaube und des Heckdeckels lackiert. Die gewählten Prozessparameter sorgen dafür, dass der Sprühkegel an die zu lackierende Geometrie angepasst wird. Innenräume werden üblicherweise mit einem schmalen und gerichteten Strahl lackiert,

während bei der Außenhaut ein breiter, flächendeckender Strahl zum Einsatz kommt.

Bei der Lackierung der Außenflächen des Fahrzeugs wird zusätzlich Hochspannung verwendet. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes und Aufladen der Lackpartikel kann der zielgerichtete Lackauftrag unterstützt werden. Auf die geladenen Partikel wirkt die elektrische Feldkraft und lenkt sie entlang der Feldlinien zur Fahrzeugoberfläche. Unterschiedliche Aufladungskonzepte und eine genauere Prozessbeschreibung sind in Kapitel 2.2.2 zu finden.

Diese Abfolge wiederholt sich für den zweiten Schichtauftrag des Wasserbasislackes, der direkt ohne eine vorherige Trocknung erfolgt (Nass-in-Nass-Lackierung). Erst danach durchläuft die Karosserie einen Zwischentrockner, welcher die Lackschichten entfeuchtet.

Im letzten Schichtauftrag wird ebenfalls in der zuvor beschriebenen Reihenfolge (CC innen, CC außen) der Klarlack appliziert. In einem letzten Trocknerdurchlauf werden die Lösungsmittel abgedampft und der Lack vollständig ausgehärtet.

Während die Roboterbahnen üblicherweise für alle Innenlackierungen und Außenlackierungen jeweils gleich bleiben, gibt es große Unterschiede in den übrigen Prozesseinstellungen. Wie Abbildung 2.3 verdeutlicht, kommen für die sechs Prozessschritte allein vier verschiedene Zerstäuber zum Einsatz. Die Prozesseinstellungen pro Lackierschritt können in einer sogenannten Brushmatrix zusammengefasst werden. Sie beinhaltet die Brusheinstellungen bezüglich Farbmenge und Lenkluft, die während eines Lackierschrittes abgerufen werden. Beispielsweise kommen während der BC1 Außenlackierung zwölf unterschiedliche Brushkonfigurationen zum Einsatz. Die Einstellungen für Drehzahl und Hochspannung bleiben für gewöhnlich während eines Lackierschrittes konstant.

Ein Gütekriterium bei der Decklackapplikation ist die resultierende Trockenschichtdicke, also die Lackschichtdicke nach der Entfeuchtung. Abbildung 2.1 zeigt die Sollschichtdicken der einzelnen Lackschichten. Diese gilt es zu erreichen, um einen optimalen Schutz der Oberfläche zu gewährleisten. Des Weiteren spielt die Appearance, das heißt die visuelle Qualität der Oberfläche eine entscheidende Rolle. Sie ist das erste, was der Kunde wahrnimmt. Bei den farbgebenden Wasserbasislacken wird zwischen Uni-Lacken und Metallic-Lacken unterschieden. Bei letzteren ist entscheidend, dass sich der Effekt,

den die metallischen Partikel im Lack hervorrufen, ausbilden kann. Dieser hängt vom einfallenden Licht und Betrachtungswinkel ab und damit von der Ausrichtung der Metallpartikel in der getrockneten Lackschicht. In der VDI Richtlinie VDI 3455:2013-08 findet sich eine detaillierte Beschreibung der Oberflächenbeschichtungsprozesse, sowie der verwendeten Materialien und Anlagen.

2.2.1 FUNKTIONSPRINZIP DER HOCHROTATIONSZERSTÄUBUNG

Um einen gleichmäßigen Lackauftrag zu erzielen, ist es nötig, den Lack fein zu zerstäuben. Als Applikationsinstrument kommen in den stark automatisierten Prozessen der Automobilindustrie Hochrotationszerstäuber zum Einsatz. Das Prinzip der Hochrotationszerstäubung wird in vielen verfahrenstechnischen Anwendungen verwendet, um Flüssigkeiten oder Suspensionen fein zu zerstäuben. Ein in der Lebensmittel- oder Pharmaindustrie häufig genutztes Verfahren, das auf der Hochrotationszerstäubung basiert, ist die Sprühtrocknung. Durch das Zerstäuben wird die Oberfläche der Suspensionen oder Emulsionen stark vergrößert. Mit Hilfe eines kontrollierten und erhitzten Gasstroms kann dann innerhalb kürzester Zeit der flüssige Anteil verdampft werden, sodass die Festkörperanteile als Pulver zurückbleiben (vgl. BARBOSA-CÁNOVAS und VEGA-MERCADO [1996]).

Die Zerstäuber bestehen üblicherweise aus flachen Scheiben oder aus becher- oder trichterförmigen Glockentellern, die mit hohen Drehzahlen rotiert werden. Das zu zerstäubende Fluid wird im Zentrum des Zerstäubers eingeleitet und verteilt sich unter Einwirkung der Zentrifugalkräfte auf der Scheibe. Es bildet sich ein dünner Film aus, der sich bis zur Abrisskante verteilt.

An der Kante löst er sich ab und zerfällt je nach Prozesseinstellungen zunächst in Fäden oder turbulente Lamellen, die sich dann in Tropfen auflösen (vgl. Abbildung 2.4). Beim untersuchten automobilen Decklackierprozess kommen trichterförmige Zerstäuberglocken zum Einsatz. Abbildung 2.5 zeigt den in der BC1 Außenlackierung verwendeten Zerstäuber. Da es sich bei der BC1 Außenlackierung um einen elektrostatisch unterstützten Lackierprozess handelt, ist die Aufnahmeeinrichtung des Glockentellers zusätzlich von einem Kranz aus Elektroden umgeben (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Der Lack wird über eine Zuführung auf der Unterseite des Glockentellers eingeleitet. Bei der Ausbildung des Films ist es entscheidend, dass die Oberfläche stets vollständig benetzt ist. Andernfalls kommt es zu einer Rinnsalbildung und dem unkontrollierten Abwurf großer Tropfen (vgl. WOZNIAK [2003]). Aus diesem Grund ist eine Verschmutzung der Zerstäuberglocke unbedingt zu vermeiden.

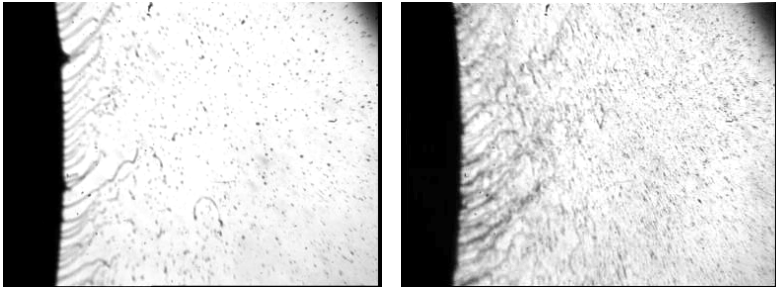


ABBILDUNG 2.4: Aufnahmen der Tropfenbildung (Quelle: Daimler AG)

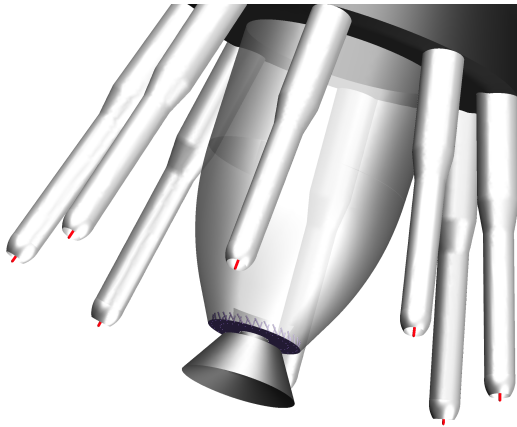


ABBILDUNG 2.5: CAD Geometrie des Zerstäubers aus der BC1 Außenlackierung

Jedes Fluid, das über Hochrotationszerstäubung in ein Spray überführt wird, besitzt eine charakteristische Tropfengrößenverteilung. Mit Hilfe von

Laserbeugungsmessverfahren ist es möglich, das Tropfenspektrum in der Nähe des Glockentellers zu erfassen. Messgeräte, die nach diesem Verfahren arbeiten, sind in der Lage, Tropfengrößen im Submikrometerbereich bis hin zu wenigen Millimetern zu ermitteln. Eine genaue Beschreibung des Verfahrens und des Vorgehens zur Ermittlung der Tropfengrößen wird in Abschnitt 2.2.4 gegeben.

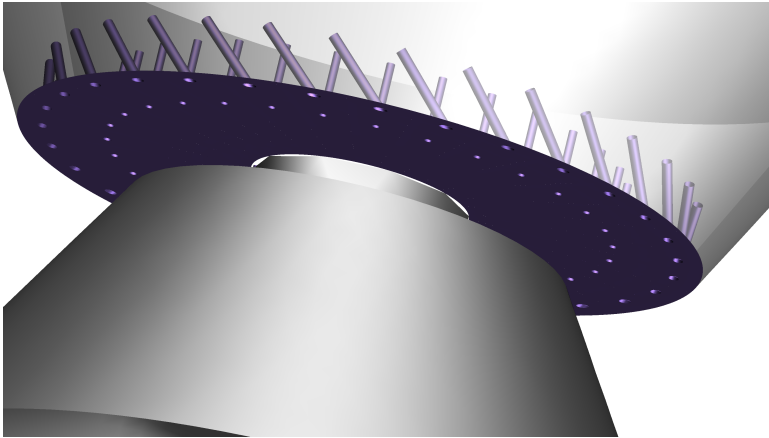


ABBILDUNG 2.6: Schematische Darstellung des Lenkluftrings und der Lenkluftbohrungen

Die Zerstäubung des Lacks wird von der Lenkluft unterstützt. Sie ist eine wichtige Prozessgröße in der Lackierung mittels Hochrotationszerstäubung und übernimmt zwei Funktionen. Sie wird über den Lenkluftring oberhalb der Zerstäuberglocke zugeführt, um die Lackpartikel in Richtung Lackiergut zu lenken und zusätzlich den Zerfallsprozess zu unterstützen. Je nach Hersteller und Ausführung gibt es unterschiedliche Anordnungen der Lenkluftbohrungen. Oft besitzt der Lenkluftring zwei Reihen ringförmig angeordneter Bohrungen. Eine davon steht normal zur Ringoberfläche, die zweite unter einem Winkel, sodass die Lenkluft gedraht einströmt und eine Drallströmung unter dem Zerstäuber erzeugt (vgl. Abbildung 2.6).

Über verschiedene Parameter ist es möglich, den gewünschten Brush zu formen. Ein Brush ist definiert über die Einstellungen der Prozessparameter bezüglich

der Drehzahl	n ,
der Farbmenge	\dot{V}_{FM} ,
der Lenklufteinstellungen	\dot{V}_{LL1} , \dot{V}_{LL2} ,
des Lackierabstands	d ,
der Hochspannung	U .

Für die Decklackierung wird der Glockenteller üblicherweise in einem Drehzahlbereich zwischen ca. 15 000 bis 70 000 min^{-1} betrieben. Damit ergeben sich bei einem Glockendurchmesser von 64 mm tangentielle Partikelabwurfgeschwindigkeiten von rund 50 bis 235 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Die Drehzahl, der Farbdurchfluss und die Volumenströme der Lenkluft entscheiden, wie der Sprühkegel geformt ist. Für die Innenlackierung – auch Detaillackierung genannt – wird meist ein schmaler Sprühkegel eingestellt, damit beispielsweise die Türrahmen zielgenau beschichtet werden können. Der Farbdurchfluss ist so einzustellen, dass es trotz des gerichteten Sprühstrahls nicht zu einer Überbeschichtung und damit zu Defekten wie Läuferr oder Kochern kommen kann. Bei der Außenlackierung soll ein möglichst flächiger Auftrag erfolgen, weshalb der Sprühkegel hier weit auseinander fächert. Vor allem die Lenklufteinstellung trägt entscheidend zur Sprühkegelform bei. Weiterführende Ausführungen zum Thema Zerstäubungstechnik finden sich bei WOZNIAK (2003).

2.2.2 ESTA

Mit Hilfe des elektrostatisch unterstützten Lackierprozesses (ESTA – *elektrostatische Applikation*) versucht man geladene Lackpartikel entlang der Feldlinien eines elektrischen Feldes zum Lackiergut zu lenken. Ziel dabei ist es, den Auftragswirkungsgrad (vgl. Abschnitt 2.2.3) zu erhöhen und Ressourcen zu sparen, indem weniger Lack in die Auswaschung gelangt (Oversprayreduktion). Er kommt vorzugsweise bei der Außenlackierung zum Einsatz. Das liegt zum einen daran, dass der Sprühkegel der Außenlackierung sehr breit aufgefächert ist und man erreichen möchte, dass auch weit herausgeschleuderte Partikel noch zum Lackiergut gelenkt werden können. Andererseits ist es bei der Innenlackierung schwierig, ein gerichtetes elektrisches Feld zu erzeugen, da der Zerstäuber von geerdeten Karosserieabschnitten umgeben ist. Für den Fall, dass bei der Innenlackierung dennoch Hochspannung zum Einsatz kommt, wird

sie mit deutlich geringerer Leistung betrieben als die Außenlackierung. Die bei einer Innenlackierung verwendete Hochspannung beträgt üblicherweise rund 40 kV, bei der Außenlackierung bis zu 80 kV. Die Aufladung der Lackpartikel kann über zwei unterschiedliche Konzepte erreicht werden: die Direkt- oder Kontaktaufladung und die Außen- oder Koronaaufladung.

Bei der Direktaufladung liegt der Glockenteller selbst auf Potential und das Lackiergut ist geerdet. Durch den Kontakt des Lacks mit dem Glockenteller wird den Lackpartikeln beim Ablösen eine Ladung mitgegeben. Dieses Konzept ist das aufwändigere und teurere, da im System eine Potentialtrennung vorgenommen werden muss.

Bei der Außenaufladung sind sowohl Glockenteller als auch Lackiergut geerdet. Der Zerstäuber besitzt einen Kranz aus Elektroden, an deren Ende sich eine Koronanadel befindet. An dieser Koronanadel liegt ein hohes Potential an. Durch die starke Krümmung an der Nadelspitze und die hohe elektrische Spannung entsteht ein starkes, inhomogenes elektrisches Feld. Wird ein Grenzwert für die elektrische Feldstärke überschritten, wandern Elektronen in die umgebende Luft ab. Die Luft wird ionisiert. Es bildet sich eine Ionenwolke, die den Zerstäuber umgibt. Die Lackpartikel durchqueren diese Ionenwolke und kollidieren mit den Ionen. Dabei lagern sich Ladungen an den Lackpartikeln an. Die Ladungsaufnahme erfolgt über zwei Mechanismen: die Diffusions- und die Feldaufladung. Die Diffusionsaufladung ist das dominante Aufladungsprinzip bei Partikeln im Submikrometerbereich. Dabei unterliegen die Ionen und die Lackpartikel der brownischen Bewegung, einer stochastischen thermischen Bewegung. Kommt es zur Kollision zwischen Ionen und Lackpartikeln, lagern sich Ladungen an den Lackpartikeln an. Je mehr Ladung die Lackpartikel aufnehmen, umso geringer wird die Wahrscheinlichkeit, dass es zu weiteren Kollisionen kommt, da die Ladungen das gleiche Vorzeichen besitzen und sich abstoßen. Die Diffusionsaufladung wird für das Simulationsmodell vernachlässigt, da sich das Lackpartikelspektrum typischerweise in einem Bereich von 1 – 150 µm bewegt. In diesem Bereich ist vor allem das Prinzip der Feldaufladung für die Ladung der Partikel entscheidend. Die Ionen bewegen sich entlang der Feldlinien des elektrischen Feldes. Treffen nun die Feldlinien auf die Oberfläche des Lackpartikels, kommt es zwangsläufig zur Kollision mit den Ionen. Je mehr Kollisionen es gibt, umso höher steigt die Ladung des Partikels an. Auch

hier bewirken die Coulombkräfte, dass die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen mit zunehmender Ladung abnimmt. Es stellt sich eine maximal erreichbare Sättigungsladung der Partikel ein (vgl. Kapitel 3.4).

Die Feldlinien des elektrischen Feldes treffen immer senkrecht auf die geerdete Oberfläche. Das führt dazu, dass auch die Rückseiten des Lackierguts bis zu einem gewissen Grad mit lackiert werden (Umgriff). An Kanten treffen die Feldlinien in einer höheren Dichte auf die Oberfläche, sodass eine Unterbeschichtung an den Kanten ausbleibt, gleichzeitig aber auch die Gefahr der Überbeschichtung birgt.

Eine detaillierte Beschreibung des Entstehungsprozesses der Korona und ihrer physikalischen Abläufe sind bei KÜCHLER (2005) nachzulesen. Die Modellierung der Prozessvorgänge im Rahmen der numerischen Simulation dieser Arbeit befindet sich in Kapitel 3.4.

2.2.3 AUFTRAGSWIRKUNGSGRAD

Die wichtigste Kenngröße in der Decklackapplikation ist die resultierende Schichtdicke auf dem Fahrzeug. Sie hängt in hohem Maße von den verwendeten Brushkonfigurationen ab, aber auch von den Roboterbahnen, die der Zerstäuber abfährt, sowie der Fahrzeuggeometrie. Um einen optimalen Schutz der Oberfläche zu gewährleisten, ist eine definierte Mindestschichtdicke einzuhalten. Aber auch Überbeschichtungen sind kritisch, da es hierdurch zu Lackdefekten wie Läuferrispen oder Kochern kommen kann. In einer idealisierten Betrachtung wäre eine gleichmäßig dicke Schicht unabhängig von der darunterliegenden Fahrzeuggeometrie wünschenswert, die so in der Realität nicht erreicht werden kann, da das Schichtprofil die Form einer Gauß-Verteilung besitzt. Damit die Lackschicht dennoch ein möglichst gleichmäßiges Niveau erreicht, werden die Roboterbahnen überlappend angeordnet.

Lacktropfen, die das Lackiergut nicht erreichen oder an nicht vorgesehenen Stellen deponieren, werden als Overspray bezeichnet. Diesen Anteil zu reduzieren ist ein wichtiger Aspekt, um möglichst effektiv und effizient zu arbeiten. Auch für die Oberflächenqualität spielt Overspray eine entscheidende Rolle. Wenn beispielsweise Lackpartikel während der Innenlackierung auf der Außenhaut deponieren und dort antrocknen, können diese unter Umständen

in der später aufgetragenen Lackschicht nicht mehr angelöst werden und beeinträchtigen das Lackierergebnis.

Eine Bewertung über die Effizienz eines Beschichtungsvorgangs liefert der Auftragswirkungsgrad (AWG). Er beschreibt das Verhältnis der auf dem Werkstück deponierten Lackmasse zur insgesamt versprühten Lackmasse:

$$\eta_A = \frac{m_d}{m_v} \quad (2.1)$$

mit m_d : deponierte Lackmasse,
 m_v : versprühte Lackmasse.

Für eine effiziente Lackierung wird also ein möglichst hoher Auftragswirkungsgrad angestrebt.

Für weitere Informationen zur Auftragswirkungsgradermittlung vergleiche DIN EN 13966-1:2003-09 (2003).

2.2.4 MESSVERFAHREN

Im Folgenden seien einige Messverfahren vorgestellt, die in der Charakterisierung des Lackierprozesses Anwendung finden und auch im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kamen.

TROPFENGROSSENMESSUNG ÜBER LASERBEUGUNGSSPEKTROMETRIE

Die Tropfengrößenverteilung des Sprühbilds ist eine wichtige Einflussgröße des Lackierprozesses. Sie bestimmt u.a. die Flugbahn der Tropfen und damit direkt das Sprühprofil. Die Kenntnis der Tropfengrößenverteilung ist ein entscheidender Baustein im Prozessverständnis. Sie kann mit Hilfe eines optischen Messverfahrens über Laserbeugung ermittelt werden. Abbildung 2.7 zeigt schematisch den Aufbau eines Laserbeugungsspektrometers. Der monochromatische Strahl eines Helium-Neon-Lasers wird über eine erste Linse parallel aufgeweitet. Weiter dahinter befindet sich eine Fourierlinse, die das parallel auftreffende Licht wieder bündelt. In den Zwischenraum der beiden Linsen wird die Probe eingebracht und trifft dort auf den Lichtstrahl. Das Licht wird an der Tropfenoberfläche gestreut. Ein Detektor, der sich hinter der Fourierlinse befindet, nimmt das Beugungsbild der gestreuten Lichtstrahlen auf. Die Streulichtintensitäten des auftreffenden Beugungsmusters werden

über Algorithmen ausgewertet. Zur Bestimmung der Tropfengrößen kommen zwei Konzepte zum Einsatz, die Fraunhofer-Theorie und die Mie-Theorie. Die Fraunhofer-Theorie kann für Partikel in einem Größenbereich $d_T > 50 \mu\text{m}$ verwendet werden. Beide Modelle liefern in diesem Bereich ähnliche Ergebnisse (ISO 13320:2009-12). Ein Vorteil des Fraunhofer-Modells ist, dass die optischen Eigenschaften des gemessenen Stoffes nicht bekannt sein müssen. Für Partikel $d_T < 50 \mu\text{m}$ wird die Mie-Theorie empfohlen, die jedoch nur Gültigkeit für homogene sphärische Partikel besitzt und eine Kenntnis des komplexen Brechungsindex des Stoffs voraussetzt. Die Tropfengrößenverteilung wird volumenverteilt ausgegeben. Ein entscheidender Vorteil dieses Messverfahrens ist die kurze Messzeit. Eine tiefergehende Beschreibung des Verfahrens findet sich bei WOZNAK (2003) und in ISO 13320:2009-12.

Die in dieser Arbeit verwendeten, gemessenen Tropfengrößenverteilungen wurden mit dem Gerät Spraytec der Firma Malvern aufgenommen. Dabei werden die Tropfen in der Nähe des Glockentellers gemessen. Da beim Messaufbau sichergestellt werden muss, dass die Optiken während der Messung möglichst wenig verschmutzt werden, kann nicht immer mit realen Prozesseinstellungen gemessen werden. Alle verwendeten Tropfenverteilungen sind mit einer geraden Lenkluft von $175 \frac{\text{Nl}}{\text{min}}$ und ohne Hochspannung gemessen. Diese Abweichung ist bei der Bewertung der Simulation im Auge zu behalten.

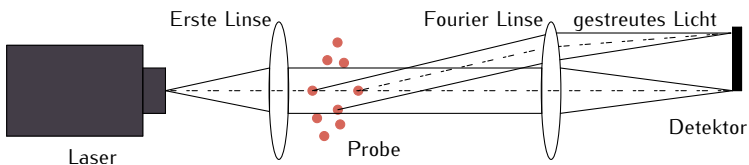


ABBILDUNG 2.7: Schematischer Aufbau eines Laserbeugungsspektrometers (nach ISO 13320:2009-12)

MAGNETINDUKTIVE SCHICHTDICKENMESSUNGEN

Beim magnetinduktiven Verfahren handelt es sich um ein zerstörungsfreies Messverfahren zur Bestimmung einer nichtmagnetischen Schichtdicke auf magnetisierbaren Grundmetallen. Abbildung 2.8 zeigt schematisch das Konzept

eines magnetinduktiven Messverfahrens. Der Erregerstrom I im Inneren des

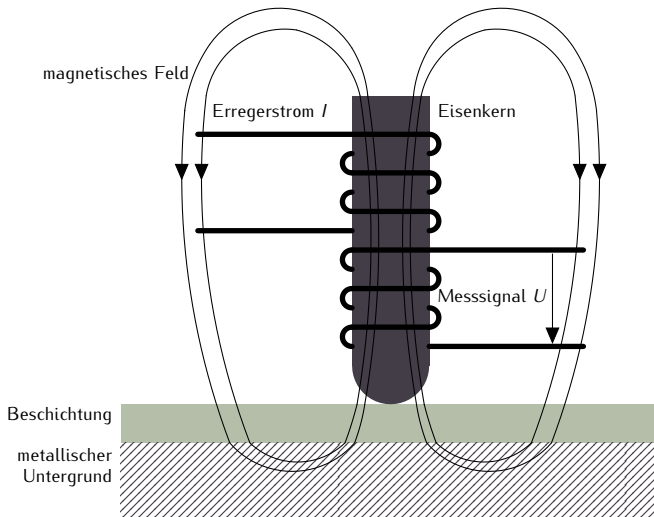


ABBILDUNG 2.8: Schematische Darstellung des magnetinduktiven Messverfahrens (nach DIN EN ISO 2178:2016-11)

Prüfkopfes erzeugt ein niederfrequentes, magnetisches Wechselfeld, das die Beschichtung und das Substrat durchdringt. Die Stärke des Magnetfelds hängt von der Distanz zwischen Messsonde und dem Grundmetall ab. Die Messspule registriert das Magnetfeld und die resultierende induzierte Spannung U . Die Schichtdicke und damit der Abstand zwischen Spule und Untergrund bestimmt die Stärke des Messsignals. Über bekannte funktionale Zusammenhänge kann das Messsignal im Messgerät direkt in die Schichtdicke umgerechnet werden. Zur Kalibrierung der Messung muss zunächst eine Ausgangsmessung auf einem unbeschichteten Ausschnitt des Grundmetalls erfolgen. Detaillierte Informationen finden sich in der Norm DIN EN ISO 2178:2016-11 über magnetische Messverfahren.

3

NUMERISCHE SIMULATION DER DECKLACKAPPLIKATION

In diesem Kapitel werden zunächst der Stand der Technik zur Simulation von Lackierprozessen beleuchtet sowie ein Überblick über den strömungstheoretischen Hintergrund der numerischen Strömungssimulation und die zum Einsatz kommende Software gegeben. Dabei werden die mathematischen Modellgleichungen vorgestellt, auf deren Basis das System der Decklackierung beschrieben wird.

3.1 STAND DER TECHNIK

Die Notwendigkeit, den hochkomplexen Lackierprozess simulativ abzubilden und zu untersuchen, wurde schon früh erkannt. Auf Grund fehlender Rechnerleistung konnten anfangs jedoch lediglich einzelne Phänomene oder Teilprozesse abgebildet werden.

Die Mechanismen der Koronaentladung wurden von mehreren Autoren simulativ untersucht (vgl. ADAMIAK und ATTEN [2004]; ADAMIAK und ZHAO [2005]; ZHAO und ADAMIAK [2005]; ZHANG und ADAMIAK [2008]). Bei diesen Beiträgen handelt es sich üblicherweise um zweidimensionale Modelle, die dazu dienen, das grundlegende Prozessverständnis zu unterstützen. Als numerische Methoden kommen die Randelementmethode, die Finite-Element-Methode sowie die Charakteristikenmethode zum Einsatz. Untersuchungsgegenstand ist häufig der Ionenwind, der durch die Bewegung der geladenen Ionen entsteht, jedoch beim elektrostatisch unterstützten Lackierprozess eine untergeordnete Rolle spielt. Die in den Veröffentlichungen verwendete geometrische Spitze-Platte-

Anordnung (vgl. KÜCHLER [2005]) entspricht im Grundsatz der Anordnung von Koronanadel und Lackiergut beim Lackierprozess.

Eine Berechnung der Filmbildung am Glockenteller findet sich bei DOMNICK u. a. (2008). Unter Verwendung eines Volume-of-Fluid Modells berechnen die Autoren die sich einstellende Filmschichtdicke auf der Verteilerscheibe und untersuchen den Film in Hinblick auf Lufteinschlüsse.

ELLWOOD und BRASLAW (1998) stellten schon früh ein Modell zur Berechnung des elektrostatisch unterstützten Lackierprozesses vor. Sie betrachten dabei einen Zerstäuber mit Direktaufladung. Das Rechenggebiet nehmen sie vereinfachend als axialsymmetrisch an. Sie berücksichtigen bereits die Kopplung von Partikelphase und elektrischem Feld und stellen den starken Einfluss heraus, den die geladenen Partikel auf das elektrische Feld haben.

Diesen Einfluss bestätigen auch YE u. a. in ihren Beiträgen zur Simulation einer Lackierpistole zur Pulverbeschichtung (vgl. YE u. a. [2002]; YE und DOMNICK [2003]). Sie berechnen das dreidimensionale Strömungsfeld des Prozesses sowie die Trajektorien der Partikelphase unter Berücksichtigung der elektrischen und aerodynamischen Vorgänge. Eine Interaktion der Partikel untereinander sowie die Rückwirkung der Partikel- auf die Gasphase werden vernachlässigt. Für die Partikelgrößenverteilungen und die Aufladungsmechanismen der Partikel wird auf Messergebnisse zurückgegriffen (YE u. a. [2002]), bzw. ein Modell eingeführt, das die zeitabhängige Partikelaufladung beim Flug durch das Ionenfeld berechnet (YE und DOMNICK [2003]). Simulationsergebnisse werden anhand verschiedener Messergebnisse validiert. Beide Veröffentlichungen beschränken sich auf einen stationären Zerstäuber und die daraus resultierende statische Schichtdickenverteilung. Eine dynamische Schichtdickenverteilung wird künstlich erzeugt, in dem die statischen Ergebnisse entlang einer gedachten Beschichtungsrichtung bewegt und aufintegriert werden. So ist es den Autoren möglich, die Simulationsergebnisse auch mit Schichtdickenmessungen zu vergleichen, die aus einer linearen Zerstäuberbewegung entstanden sind.

DOMNICK u. a. entwickeln diese Methode weiter für die Simulation von Hochrotationszerstäubern und stellen eine Applikation sowohl für den Fall der Direktaufladung (vgl. DOMNICK u. a. [2005]) vor, als auch für die externe Partikelaufladung mittels Koronaentladung (vgl. DOMNICK u. a. [2006]). Das Modell berücksichtigt umfassende physikalische Aspekte des elektrostatisch unter-

stützten Lackierprozesses mittels Hochrotationszerstäubung. Im Gegensatz zum Simulationsmodell der Pulver-Lackierpistole wird nun auch der Einfluss der Partikelphase auf das Strömungsfeld berücksichtigt. Tropfengrößenverteilungen und die Ladung der Lackpartikel (für den Fall mit Direktaufladung) werden aus Messungen übernommen. Beide Veröffentlichungen beschränken sich ebenfalls auf einen stationären Zerstäuber, der eine einfache Zielgeometrie in Form eines ebenen Blechs beschichtet. Die berechneten Schichtdickenverteilungen werden anhand von realen Schichtdickenmessungen validiert.

Die erneute Erweiterung des Modells um eine Bewegung des Zerstäubers liefert bezüglich der simulierten Schichtdickenverteilungen im Vergleich mit Messungen keine zufriedenstellenden Resultate (vgl. YE [2006]). Die Autoren verwenden eine einfache Zielgeometrie in Form eines ebenen Blechs, sowie eine geradlinige, konstante Bewegungsform des Zerstäubers. Limitiert wird der Versuch vor allem durch die Netzgröße, die Anzahl der Partikel und die daraus resultierende Rechenzeit, sowie den Entwicklungsstand der eingesetzten kommerziellen Software.

POPPNER (2007) beschreibt in seiner Dissertation die Entwicklung von zwei Software-Tools zur Simulation des elektrostatisch unterstützten Lackierprozesses mittels Hochrotationszerstäubung. Er modelliert sowohl den Prozess mit Direktaufladung als auch den mit Außenauffladung und berücksichtigt dabei umfassend die physikalischen Phänomene des Prozesses. Als Zielgeometrien verwendet er CAD-Daten von realen Fahrzeugkarosseriebauteilen. Seine Arbeit umfasst sowohl Detailanalysen von Teilprozessen als auch eine Gesamtsimulation mit bewegtem Zerstäuber. Auch seine Berechnungen sind limitiert auf Grund fehlender Rechenleistung und fehlerhafter Berechnung durch die verwendete Software. Die simulierten Schichtdickenbilder können eine qualitative Annäherung an die Versuchsergebnisse darstellen, weichen aber besonders im Fall der Außenauffladung quantitativ deutlich von den Messungen ab.

TOJIC u. a. stellen bei ihren Arbeiten die Umsetzung einer Zerstäuberbewegung in den Vordergrund (vgl. TOJIC u. a. [2012]; TOJIC u. a. [2013]). Dabei bewegen sie jedoch nicht den Zerstäuber selbst, sondern die Zielgeometrie. Als Bewegungsform verwenden sie eine stückweise geradlinige Bewegung, wie sie der realen Bewegung beim Lackieren nahe kommt. Die Zielgeometrie

besteht aus einem einfachen ebenen Blech. Dadurch dass sie lediglich das Blech bewegen, nicht aber den Zerstäuber, werden Trägheitseffekte, die auf den Sprühstrahl wirken, nicht berücksichtigt.

Die Beiträge von RUNDQVIST u. a. und MARK u. a. zum Thema unterscheiden sich von den bisher vorgestellten. Sie verwenden ein eigenes Software-Tool, welches am Fraunhofer-Chalmers Center in Göteborg entwickelt wurde und mit schnellen Berechnungszeiten aufwarten kann (vgl. RUNDQVIST u. a. [2010]; MARK u. a. [2013]). RUNDQVIST u. a. stellen die Methode am Beispiel der Simulation eines Heckdeckels vor, welche 90 Minuten Rechenzeit auf einem gewöhnlichen Laptop benötigt. Eine elektrostatische Unterstützung kommt nicht zum Einsatz. In MARK u. a. (2013) wird die Simulation der Lackierung eines Kotflügels vorgestellt, die eine ähnliche Rechenzeit in Anspruch nimmt. Hierbei wird die elektrostatisch unterstützte Lackierung mittels Direktaufladung betrachtet. Die Autoren begründen die enorme Zeitersparnis im Vergleich zu anderen Ansätzen mit der Verwendung der Immersed-Boundary-Method in Verbindung mit einem Octree-Gitter. Dadurch, so die Erklärung, können bewegte Objekte in das Rechengebiet eingebracht werden, ohne dass die Rechenzeit zunimmt. Die Entwicklung der Methode wird in MARK und VAN WACHEM (2008) und MARK u. a. (2011) diskutiert.

Die vorgestellten Beiträge zeigen viele erfolgreiche Ansätze. Während sie die Physik der beteiligten Teilprozesse sehr detailliert abbilden, unterliegen sie doch noch gewissen Abstraktionen zum realen Lackierprozess. So wird nur vereinzelt eine Zerstäuberbewegung umgesetzt, oft wird ein stationärer Zerstäuber simuliert. Die Zielgeometrien sind zumeist ebene Bleche, eine systematische Anwendung auf realen Fahrzeuggeometrien bleibt aus, die Lackierung eines gesamten Fahrzeugrohbaus unter Verwendung mehrerer Zerstäuber wird nicht abgebildet. Aus den bestehenden Defiziten wird im folgenden Abschnitt die Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet.

3.2 ZIELSETZUNG DER ARBEIT

Mit den im Stand der Technik vorgestellten Simulationsmethoden können bereits Einzel-Phänomene des Lackiervorgangs bis hin zur Lackierung einzelner Bauteile untersucht werden. Eine gesamtheitliche Betrachtung des Prozessgeschehens fehlt. Um den Prozess jedoch vollumfänglich untersuchen zu können, wird ein Modell benötigt, dass möglichst viele Aspekte des realen Prozesses erfasst. Dazu gehört die Abbildung des Lackiervorgangs an einer realen Fahrzeuggeometrie sowie die Berücksichtigung mehrerer gleichzeitig agierender Lackierroboter.

Die vorgestellten Methoden sind meist Limitationen unterworfen, die sowohl in der Hardware als auch in der Software begründet liegen. Aus diesem Grund ist bei der Entwicklung der Simulationsmethode darauf zu achten, dass sie effizient gestaltet wird. So kann trotz zunehmender Komplexität ein sinnvoller Einsatz zur Unterstützung von Entwicklung und Produktion gewährleistet werden. Denn durch die zunehmende Einsparung von Prototypen zur Absicherung von Produktionsprozessen nimmt die Bedeutung qualifizierter Simulationsmethoden zu.

Ziel der Arbeit ist es, die genannten Defizite auszugleichen und erstmalig den Lackiervorgang an einer vollständigen Fahrzeuggeometrie digital zu beschreiben, sowie die noch bestehende Lücke in der digitalen Fertigungsprozesskette zwischen KTL-Simulation und Trocknersimulation zu schließen. Durch die Entwicklung einer Simulationsmethode wird der Lackiervorgang unter Berücksichtigung realer Prozesseinstellungen und mehrerer gleichzeitig agierender Lackzerstäuber berechnet. So entsteht ein digitales Analysewerkzeug, das es ermöglicht, den realen Lackierprozess zu unterstützen und zu optimieren.

Im Fokus der Methode steht der Prozessschritt der BC1 Außenlackierung mit elektrostatischer Unterstützung. Durch den Einsatz der Außenaufladung mittels Koronaentladung stellt dieser Schritt den schwierigsten abzubildenden Fall dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurden bereits Simulationsergebnisse der Innenlackierung mit Wasserbasislack sowie der Außenlackierung mit Klarlack vorgestellt (vgl. BRACHT und RITZ [2016]). Die Prozessschritte der Innenla-

ckierung und der Klarlacklackierung werden entweder ohne elektrostatische Unterstützung oder mit Hilfe der Direktaufladung durchgeführt. Da die Lacktropfen ihre Ladung bei der Simulation der Direktaufladung als Anfangswert erhalten, ist die Modellierung einfacher als bei der zeitabhängigen Außenaufladung. Die Vorgehensweise zur Modellierung der Partikelladung wird in Abschnitt 3.4 beschrieben. Wie im tatsächlichen Prozess kommen mehrere Zerstäuber gleichzeitig zum Einsatz, die den realen Roboterpfaden folgen und den Wechsel der Brushparameter ausführen. Im nächsten Abschnitt werden die hierfür verwendeten numerischen Methoden und Modelle vorgestellt.

3.3 GRUNDLAGEN DER STRÖMUNGSLEHRE

Zur Beschreibung der Lackierung mittels Hochrotationszerstäubung wird ein Euler-Lagrange-Zweiphasenströmungsmodell verwendet. Dabei werden die kontinuierliche Euler-Phase (Luft) und die disperse Lagrange-Phase (Lacktropfen) unterschieden. Die Grundlage für dieses Modell bilden die Navier-Stokes-Gleichungen. Sie setzen sich zusammen aus den Erhaltungssätzen für Masse (3.1), Impuls (3.2) und Energie (3.3) und bilden ein System nichtlinearer partieller Differentialgleichungen. Es gibt eine allgemeine Beschreibung für strömungsmechanische Probleme an.

Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \, dV + \int_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, dS = 0 \quad (3.1)$$

Impulserhaltung

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} \, dV + \int_S (\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + \mathbf{S}) \cdot \mathbf{n} \, dS = \sum \mathbf{f} \quad (3.2)$$

Energieerhaltung

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho h \, dV + \int_S (\rho h \mathbf{v} + \mathbf{S} : \mathbf{v} + q) \cdot \mathbf{n} \, dS = \sum \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} \quad (3.3)$$

mit ρ : Dichte,
 \mathbf{v} : Geschwindigkeitsvektor,
 \mathbf{n} : Flächennormale,
 \mathbf{f} : Vektor der Volumenkräfte,
 h : spezifische Enthalpie,
 \mathbf{S} : Spannungstensor,
 q : Wärmestrom.

Auf Grund ihrer Komplexität sind die Navier-Stokes-Gleichungen schwer lösbar. Nur für einige wenige Spezialfälle kann überhaupt eine analytische Lösung angegeben werden. Bei der mathematischen Beschreibung einer realen Strömung können jedoch meist vereinfachte Strömungsmodelle eingeführt werden, sodass eine Lösung möglich wird. Dennoch kommen zur effizienten

Lösung fluiddynamischer Problemstellungen in der Regel numerische Methoden zum Einsatz.

Vereinfachungen, die die Definition des Fluids betreffen, sind beispielsweise die Annahme eines idealen Gases oder eines inkompressiblen Fluids ($\rho = \text{const.}$). Die Zustände eines idealen Gases werden nach dem idealen Gasgesetz berechnet:

$$pV = mR_i T \quad (3.4)$$

mit p : Gasdruck,
 V : Gasvolumen,
 m : Masse,
 R_i : individuelle Gaskonstante,
 T : Temperatur.

Nahezu jede reale Strömung ist eine turbulente Strömung. Das bedeutet, dass Reibungskräfte innerhalb der Strömung auftreten, die Instationaritäten in der Teilchenbewegung hervorrufen und Verwirbelungen erzeugen. Diese treten oft in sehr unterschiedlichen Größen- und Zeitskalen auf, was ihre Beschreibung erschwert. Die Reynoldszahl Re ist eine dimensionslose Kennzahl und beschreibt eine Strömung hinsichtlich ihres Verhältnisses von Trägheits- zu Reibungskräften. Überwiegen die Trägheitskräfte, kommt es zu sehr großen Reynoldszahlen. Wird ein systemabhängiger, kritischer Wert $Re > Re_{\text{krit}}$ spricht man von einer turbulenten Strömung.

$$Re = \frac{v_0 \rho L_0}{\eta} = \frac{v_0 L_0}{\nu} \quad (3.5)$$

mit v_0 : Anströmgeschwindigkeit,
 ρ : Dichte des Fluids,
 L_0 : charakteristische Länge,
 η : dynamische Viskosität des Fluids,
 ν : kinematische Viskosität des Fluids.

Für die meisten Systembeschreibungen bedarf es jedoch keiner detaillierten zeitlichen und örtlichen Auflösung der Wirbel. Für turbulente Strömungen bieten die Reynolds-gemittelten Gleichungen (RANS – *Reynolds-averaged*

Navier-Stokes equations) eine Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen.

Unter der Annahme, dass nicht die Schwankungen selbst im Detail von Interesse sind, sondern lediglich ihr Einfluss auf das mittlere Strömungsverhalten, kann eine skalare Größe ϕ in ihre zeitliche Mittelung $\bar{\phi}$ und einen Schwankungswert ϕ' aufgesplittet werden.

$$\phi(x, y, z, t) = \bar{\phi}(x, y, z) + \phi'(x, y, z, t) \quad (3.6)$$

Der Mittelwert kann dann per Integration über ein hinreichend großes Zeitintervall Δt berechnet werden:

$$\bar{\phi}(x, y, z) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi(x, y, z, \theta) d\tau. \quad (3.7)$$

Nach Anwendung dieses Ansatzes auf die entsprechenden Variablen erhält man eine Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen, die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen. Eine detaillierte Beschreibung zum Vorgehen ist bei LAURIEN und OERTEL JR. (2013) angegeben.

Durch die Mittelung entstehen neue Gleichungen mit weiteren Unbekannten. Das Gleichungssystem ist unterbestimmt. Das heißt, dass es mehr Variablen als Gleichungen gibt. Diese Problematik wird als Schließungsproblem bezeichnet. Das Schließen der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen erfolgt über die Einführung von Turbulenzmodellen.

Da die durch Turbulenzen hervorgerufenen Interaktionen sehr schwer zu beschreiben sind, dienen empirische Beobachtungen als Grundlage für eine Approximation der realen Zustände (vgl. WENDT und ANDERSON [2009]). Mit Hilfe statistischer Daten werden Modelle zur Turbulenzbeschreibung aufgestellt. Die Turbulenzmodelle unterscheiden sich sowohl in der Anwendung für ein spezifisches Problem als auch im Mehraufwand, den sie eventuell durch zusätzliche Differentialgleichungen erzeugen.

In den Berechnungen der vorliegenden Arbeit wird ein k - ϵ -Turbulenzmodell eingesetzt. Es besteht aus zwei partiellen Transportgleichungen, eine für die turbulente kinetische Energie (k) und eine für die Dissipationsrate der turbulenten kinetischen Energie (ϵ). Das k - ϵ -Turbulenzmodell ist ein sogenanntes Zweigleichungsmodell und gehört zu den am häufigsten angewandten Turbulenzmodellen, da es bei vertretbarem Rechenaufwand hinreichend genaue Ergebnisse liefert.

Während die Luft als Kontinuum betrachtet wird und zu jedem Zeitpunkt über ihre strömungsmechanischen und thermodynamischen Zustandsgrößen beschrieben werden kann, bilden die Lacktropfen eine disperse Phase, die sich innerhalb der Luft bewegt. Sie werden über die Lagrange'schen Bewegungsgleichungen modelliert. Das bedeutet, dass sie zu jedem Zeitpunkt über ihre Position \mathbf{r}_T und ihre Geschwindigkeit \mathbf{v}_T definiert sind.

$$\mathbf{r}_T(t) = \begin{pmatrix} r_{xT}(t) \\ r_{yT}(t) \\ r_{zT}(t) \end{pmatrix} \quad \mathbf{v}_T(t) = \begin{pmatrix} v_{xT}(t) \\ v_{yT}(t) \\ v_{zT}(t) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Neben diesen Zustandsgrößen besitzen sie die Masse m_T . Unter der Annahme, dass $m_T = \text{const.}$ und die Lacktropfen kugelförmig auftreten, berechnet sie sich über

$$m_T = \frac{\pi}{6} \rho_T d_T^3. \quad (3.9)$$

Während ihrer Bewegung durch das Strömungsfeld sind die Lacktropfen unterschiedlichen Einflüssen ausgesetzt, das heißt, dass verschiedene Kräfte auf sie wirken. In der Impulsgleichung für die Lacktropfen stellt die Summe dieser Kräfte die rechte Seite dar:

$$m_T \frac{d\mathbf{v}_T}{dt} = \sum_i \mathbf{F}_i \quad (3.10)$$

Welche Kräfte berücksichtigt werden müssen, hängt von der Physik des vorliegenden Prozesses ab. Für den Fall der Lackiersimulation werden die im Folgenden vorgestellten Kräfte berücksichtigt.

STRÖMUNGSWIDERSTAND

Der Strömungswiderstand gibt an, welche Widerstandskraft die Tropfen bei ihrer Bewegung durch die Luft erfahren. Er ist formuliert als

$$\mathbf{F}_W = \frac{1}{2} c_W \rho_L A_T |\mathbf{v}_\Delta| \mathbf{v}_\Delta \quad (3.11)$$

- mit c_W : Strömungswiderstandskoeffizient,
 ρ_L : Dichte der Luft,
 A_T : projizierte Fläche des Tropfens,
 v_Δ : relative Geschwindigkeit zwischen Partikel und Luft.

Der Strömungswiderstandskoeffizient c_W wird über die Schiller-Naumann Gleichung wiedergegeben:

$$c_W = \begin{cases} \frac{24}{Re_T} \left(1 + 0,15 Re_T^{0,687} \right) & \text{für } Re_T \leq 10^3 \\ 0,44 & \text{für } Re_T > 10^3 \end{cases} \quad (3.12)$$

- mit Re_T : Reynolds-Zahl der Tropfen.

DRUCKKRAFT

Desweiteren wirkt auf die Tropfen die Druckkraft. Sie wird von der Luft, welche die Tropfen umgibt, ausgeübt und ist definiert als

$$F_P = -V_T \nabla p_L \quad (3.13)$$

- mit V_T : Volumen des Tropfens
 ∇p_L : Gradient des statischen Drucks der Luft.

GRAVITATION

Mit der Gravitationskonstante g wirkt auf die Tropfen die Gravitationskraft

$$F_G = m_T g \quad (3.14)$$

- mit g : Gravitationskonstante.

ELEKTRISCHE FELDKRAFT

Beim elektrostatisch unterstützen Lackierprozess werden die Lacktropfen mittels Direkt- oder Außenaufladung aufgeladen. Befindet sich eine Ladung innerhalb eines elektrischen Felds, so wirkt auf sie die elektrische Feldkraft

$$F_q = q_T E \quad (3.15)$$

mit q_T : Ladung eines Tropfens
 E : elektrisches Feld.

Den größten Einfluss auf die Partikel hat der Luftwiderstand. Durch ihn werden die Partikel kurz nach dem Ablösen vom Glockentellerrand stark abgebremst. Aber nicht nur die disperse Phase wird durch die kontinuierliche Phase beeinflusst. Auch die Rückrichtung ist unter bestimmten Voraussetzungen von Bedeutung. Der Einfluss der dispersen Phase auf die kontinuierliche hängt vor allem davon ab, wie groß die Beladung der dispersen Phase durch die Tropfen ist (vgl. LAURIEN und OERTEL JR. [2013]). Wenn sie nicht vernachlässigbar gering ist, haben die Teilchen der Lagrange-Phase einen Einfluss auf die Gasphase und die Gleichungen der Phasen können nicht nacheinander, sondern müssen gleichzeitig berechnet werden (vgl. FERZIGER und PERIĆ [2008]). Die Wechselwirkungen des Teilchens mit der Luft, von der es umgeben wird, müssen zu jedem Zeitschritt berechnet werden (vgl. Abbildung 3.1).

Da Massen- und Energieaustausch zwischen den Phasen für die Abbildung des Lackierprozesses nicht berücksichtigt werden, bleibt lediglich der Impulsaustausch zu betrachten. Dieser wird über zusätzliche Quellterme in die Gleichungen der kontinuierlichen Phase eingebracht, sodass der Einfluss der dispersen Phase einbezogen wird. Im Fall einer ESTA-Lackierung ist auch der Einfluss der geladenen Tropfen auf das anliegende elektrische Feld zu berücksichtigen. Dazu gilt es zunächst, die Dynamik des Aufladungsprozesses zu beschreiben.

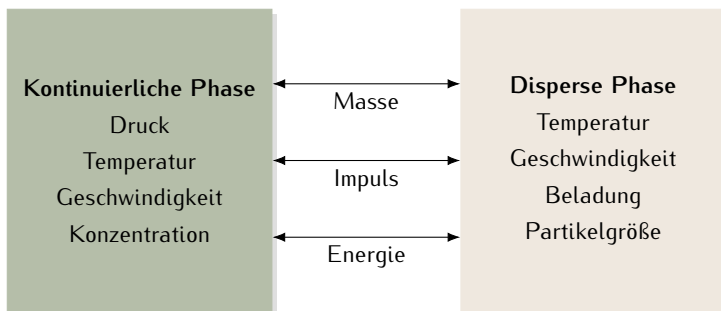


ABBILDUNG 3.1: Zwei-Wege-Kopplung (nach CROWE u. a. [1998])

3.4 MODELLIERUNG DER PARTIKELLADUNG

Die Idee, feine Partikel mit Hilfe elektrischer Ladung und mit Hilfe eines elektrischen Feldes zu lenken, kam schon früh bei der Elektrofilterung zum Einsatz (vgl. MIERDEL und SEELIGER [1935]). Durch das Anreichern von beispielsweise Staubpartikeln mit Ladung und das anschließende Abscheiden können Gase von diesen Partikeln gereinigt werden. Das Aufladungsprinzip bei der ESTA-Lackierung ist dem sehr ähnlich. Wie zuvor beschrieben, wird zwischen der Direkt- oder Kontaktaufladung und der Außenaufladung unterschieden.

Bei der Direktaufladung werden die Partikel über ihren Kontakt mit dem Glockenteller, an dem die Hochspannung anliegt, aufgeladen. Das Modell für die Partikelladung ist einfacher als das der Außenaufladung, da die Partikel mit einer Anfangsladung beaufschlagt werden, die sich während ihrer Bewegung zur Zielgeometrie nicht mehr ändert. Für die Festlegung der Ladungsmenge, die ein Tropfen nach Verlassen des Zerstäubers mit sich trägt, wird die Rayleigh Grenzladung q_R verwendet (vgl. RAYLEIGH [1882])

$$q_R = 8\pi\sqrt{\epsilon_0\sigma_T r_T^3} \quad (3.16)$$

mit ϵ_0 : Permittivität des Vakuums,
 σ_T : Oberflächenspannung des Tropfens,
 r_T : Tropfenradius.

Die Rayleigh Grenzladung gibt an, wieviel Ladung ein Tropfen aufnehmen kann, bevor er anfängt instabil zu werden und zu zerfallen. Wenn die Tropfen den Glockenteller verlassen, besitzen sie jedoch nur einen Bruchteil dieser Ladung. Für die Simulationen mit Direktaufladung wird eine Anfangsladung q_0 von

$$q_0 = 0,05 \, q_R \quad (3.17)$$

angenommen.

Die Modellierung der Tropfenaufladung für die Lackierung mit Außenaufladung gestaltet sich komplexer. Die Lacktropfen nehmen ihre Ladung erst auf, während sie das mit Ionen angereicherte elektrische Feld passieren. Wie zuvor beschrieben, ist von den zwei Mechanismen Diffusions- und Feldaufladung vor allem die Feldaufladung bei der Außenaufladung ausschlaggebend (vgl. Kapitel 2.2.2). Nach PAUTHENIER und MOREAU-HANOT (1932) kann der

zeitliche Zusammenhang für die Felddaufladung eines Lacktropfens wie folgt wiedergegeben werden

$$\frac{dq_T}{dt} = \frac{q_S}{\tau} \left(1 - \frac{q_T}{q_S}\right)^2 \quad \text{mit } \tau = \frac{4\epsilon_0}{N_l e \mu} \quad (3.18)$$

mit q_T : Ladung eines Tropfens,
 q_S : Sättigungsladung,
 ϵ_0 : Permittivität des Vakuums,
 N_l : Ionendichte,
 e : Elementarladung,
 μ : Ionenmobilität.

Die maximal zu erreichende Sättigungsladung ist definiert über

$$q_S = 3\pi \left(\frac{\epsilon_T}{\epsilon_T + 2} \right) \epsilon_0 d_T^2 E \quad (3.19)$$

mit ϵ_T : Permittivität des Lacktropfens,
 ϵ_0 : Permittivität des Vakuums,
 d_T : Tropfendurchmesser,
 E : lokale elektrische Feldstärke.

Für die Ionenbeweglichkeit wird ein Wert von $\mu = 2.1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{Vs}}$ angesetzt und befindet sich damit in der Größenordnung, wie sie auch in anderen Quellen angegeben wird (vgl. ANG [1981]; BÖTTNER [2002]; DOMNICK u. a. [2006]).

Die Berechnung des Beitrags der Ionen zur Raumladungsdichte ρ gestaltet sich sehr schwierig. In den hier vorgestellten Simulationen wird die in Gleichung 3.18 vorkommende Raumladungsdichte der Ionen $\rho_l = N_l e$ als konstant angenommen, wie es auch ANG und LLOYD tun (vgl. ANG und LLOYD [1987]). Leider geben die Autoren in ihrer Arbeit keinen Zahlenwert an. BÖTTNER gibt für Koronaentladungen einen Wert von $N_l = 10^5$ an (vgl. BÖTTNER [2002]). Dieser wird auch in der vorliegenden Arbeit verwendet. YE und DOMNICK beschreiben die Vorgehensweise sehr detailliert, wenn der Einfluss der Ionen auf das elektrische Feld berücksichtigt werden soll. Dieser Weg wird in der vorliegenden Arbeit nicht gewählt, um den Rechenaufwand geringer zu halten. Die Berechnung der Raumladungsdichte würde die zusätzliche iterative Lösung eines Gleichungssystems erfordern. Diese Vereinfachung muss bei der späteren Bewertung der Simulationsergebnisse bedacht werden.

3.5 NUMERISCHE VERFAHREN UND EINGESETZTE SOFTWARE

Zur Lösung der vorgestellten Erhaltungsgleichungen wird die Finite-Volumen-Methode (FVM) verwendet. Dabei handelt es sich um ein numerisches Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen. Es ist das am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Lösung von Problemen der numerischen Strömungsmechanik. Als Grundlage der Berechnung wird das betrachtete Rechengebiet diskretisiert. Das heißt, es wird in eine finite Anzahl von Teilgebieten zerlegt (Vernetzung). Beim Finite-Volumen-Verfahren sind diese Teilgebiete Kontrollvolumina, auch Zellen genannt. Für jedes Kontrollvolumen liegen die Erhaltungsgleichungen vor. Meist werden sie für den Mittelpunkt eines Kontrollvolumens definiert. Das Finite-Volumen-Verfahren ist für viele unterschiedliche Gitterstrukturen anwendbar. Im Rahmen dieser Arbeit werden Netze verwendet, die aus hexaederförmigen Zellen bestehen. Eine detaillierte Beschreibung des Finite-Volumen-Verfahrens, der mathematischen Formulierungen und Vorgehensweisen findet sich bei VERSTEEG und MALALASEKERA (2007).

Als Software kommt das Simulationspaket STAR-CCM+ der Firma Siemens zum Einsatz. Es beinhaltet Werkzeuge für die Vernetzung, die Berechnung sowie die Auswertung der Simulationsergebnisse. Es wurde vom Hersteller um das in dieser Arbeit vorgestellte Modell der zeitabhängigen Partikelaufladung erweitert.

4

NUMERISCHE SIMULATION DES STRÖMUNGSFELDS

Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten, welche am Luftaustritt der Lenkluftbohrungen auftreten, machen eine sehr feine Vernetzung mit vielen Zellen in dem Bereich notwendig. Diese Anforderungen an die Netzgenerierung treiben die Rechenzeiten schnell in die Höhe, weshalb die Luftumströmung der Zerstäuberglocke zunächst isoliert und in einem hohen Detaillierungsgrad untersucht wird. Der dazu betrachtete Prozess beschränkt sich auf die Rotation der Zerstäuberglocke und die Lenkluftströmung. Der Zerstäuber wird nicht bewegt und die Lackzufuhr ist deaktiviert. Die Idee dieser Methode ist es, die Luftströmung in einem ersten Schritt hoch aufgelöst zu berechnen, jedoch für weitere Simulationen eine Schnittfläche (*Interface*) stromabwärts einzusetzen.

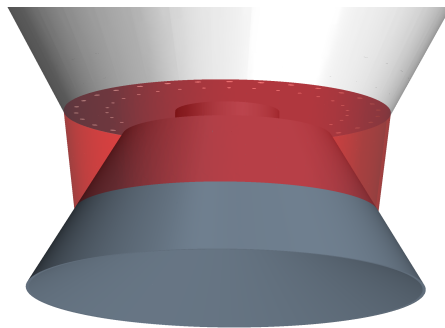


ABBILDUNG 4.1: Anordnung des Interfaces

Das Interface verläuft von der Kante des Zerstäubergehäuses bis ungefähr zur Mitte des Glockentellers (vgl. Abbildung 4.1).

Da sich dieses Interface in einem Bereich mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten befindet (vgl. Abbildung 4.2), kann hier in späteren Rechnungen eine gröbere Vernetzung zum Einsatz kommen.

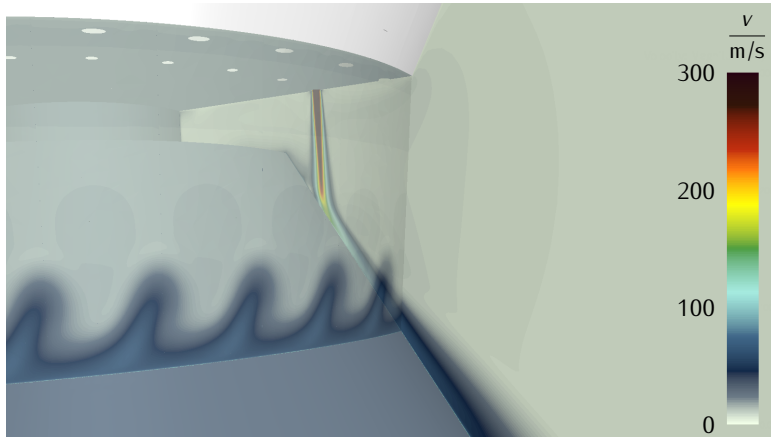


ABBILDUNG 4.2: Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten am Lenklufteintritt und am Interface

Das Interface wird dann als Geometrie­fläche verstanden und die zuvor ermittelten Größen als Randbedingung aufgebracht. Die hochaufgelösten Bereiche direkt unterhalb des Luftauslasses können dadurch weggeschnitten werden und müssen nicht erneut berechnet werden. Zu den Größen, die am Interface gespeichert werden, gehören das Vektorfeld der Geschwindigkeiten, die turbulente kinetische Energie sowie die Dissipationsrate.

Im Folgenden sollen nun zwei Möglichkeiten vorgestellt werden, das Strömungsfeld zu berechnen und die benötigten Größen am Interface herauszuschreiben. Anschließend werden die Simulationsergebnisse aus beiden Modellen vorgestellt und miteinander verglichen.

4.1 SEGMENTMODELL

Mit dem Segmentmodell wird ein vereinfachtes Modell entwickelt, welches die Rotationssymmetrie der Zerstäuberglocke ausnutzt. Dabei wird lediglich ein 12° großes Segment des Glockentellers vernetzt und berechnet (vgl. Abbildung 4.3).

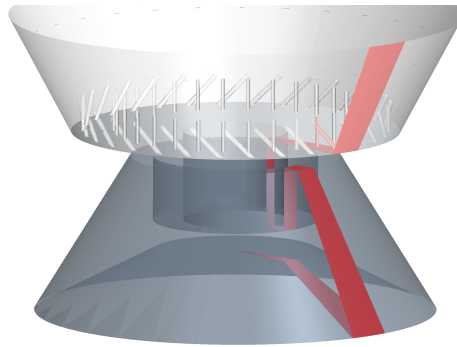


ABBILDUNG 4.3: 12° Segment des Glockentellers

Die Symmetrie wird durch die Lenkluftbohrungen bestimmt. Ein Segment umfasst jeweils eine Bohrung für die gerade Luftzufuhr und eine schräge Bohrung für die gedrehte Luftzufuhr. Um der Strömung die Möglichkeit zu geben, sich frei auszubilden, wird das Rechengebiet unterhalb des Glockentellers entsprechend groß gewählt. In der Fahrzeuglackierung beträgt der Abstand zum Lackiergut meist zwischen 200 mm und 300 mm. Die äußeren Flächen des Rechengebietes sind als Druckauslass definiert, die Seitenflächen erhalten eine Symmetrie-Randbedingung. Als Vereinfachung wird angenommen, dass sich ein stationärer Strömungszustand einstellt. Das bedeutet, dass sich die Zustandsgrößen Druck und Geschwindigkeit an einem Ort mit der Zeit nicht ändern. Dies scheint zunächst eine starke Reduktion zu sein, ergibt aber insofern Sinn, als dass die Lösung, die dem Interface entnommen wird, auch als zeitunabhängig angenommen wird. Zudem zeigen Vergleiche zwischen stationärer und transients, also zeitabhängiger Berechnung, dass die resul-

tierenden Schichtdickenverteilungen, die unter Verwendung dieser Modelle gewonnen werden, kaum Unterschiede aufweisen (vgl. Abschnitt 6.3).

Die Luft wird als ideales Gas modelliert, also als kompressibel angenommen. Diese Annahme ist wichtig, da die Luft unter hohem Druck über die Lenkluftbohrungen zugeführt wird. Am Luftaustritt entspannt sie sich und kühlt kurzzeitig ab, bevor sie sich mit der Umgebungsluft vermischt und die Raumtemperatur annimmt. Die verwendete Lenkluftmenge wird beim Lackierprozess üblicherweise in Normlitern pro Minute ($\frac{\text{Nl}}{\text{min}}$) angegeben. Das bedeutet, dass sich die Mengenangabe auf einen bestimmten Normzustand bezieht. In diesem Fall wird der Normzustand nach ISO 8778:2003-03 (2003) bei einer Temperatur $\theta_N = 20^\circ\text{C}$, einem Druck von $p_N = 10^5 \text{ Pa}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $\phi_N = 65\%$ verwendet.

Im Modell werden lediglich die Bohrungen als kleiner Teil des gesamten Luftzufuhrsystems abgebildet. Sie werden als dünne Rohre modelliert, an deren oberen Ende der einströmende Lenkluftmassenstrom als Randbedingung aufgebracht wird. Zur Verbesserung der Konvergenz wird dieser linear bis zum finalen Wert gesteigert. Die Rotationsgeschwindigkeit wird auf der Fläche des Glockentellers als Randbedingung vorgegeben. Auch hier wird der Wert linear gesteigert, um die Konvergenz zu verbessern. Die Simulation wird über 20000 Iterationen hinweg durchgeführt, sodass in den Residuen die Konvergenz der Berechnung zu erkennen ist.

4.1.1 VERNETZUNG DES SEGMENTMODELLS

Die Vernetzung des Modells bildet die Berechnungsgrundlage für die Gleichungslöser und stellt eine Diskretisierung der Modellgeometrie dar. Abbildung 4.4 zeigt das getrimmte Netz, das für das Segmentmodell zum Einsatz kommt. Es wird mit Hilfe des automatischen Vernetzers aus STAR-CCM+ erstellt. Damit die Geometrie des Modells erhalten bleibt und Details gut abgebildet werden, werden sogenannte *feature curves* ermittelt. Dabei handelt es sich um charakteristische Strukturkanten, die dem Vernetzungsalgorithmus als Orientierung dienen und die auch nach der Vernetzung noch vorliegen müssen. Neben den global festgelegten Zielzellgrößen des automatischen Vernetzers, ist es dem Anwender möglich, bestimmte Kontrollvolumina zu definieren, in

denen gesonderte Einstellungen für den Vernetzungsalgorithmus vorgenommen werden können. Bleibt eine Option unverändert, so wird sie geerbt.

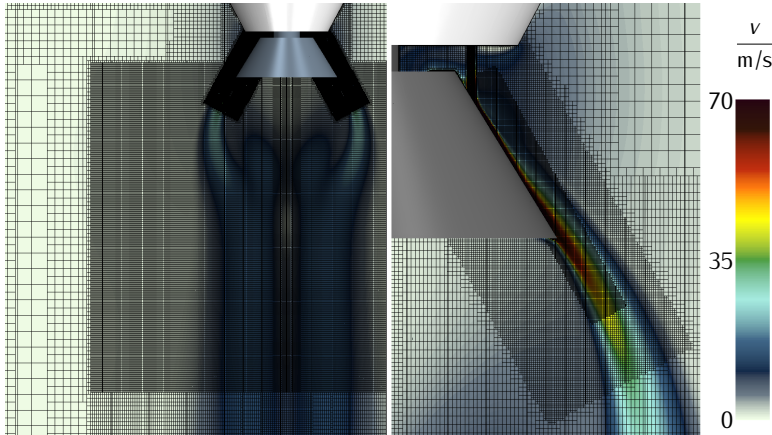


ABBILDUNG 4.4: Getrimmtes Netz des Segmentmodells mit Verfeinerungen

Ein solches Kontrollvolumen wird für den Bereich der Lenkluftbohrung erstellt. Der Bohrungsdurchmesser von 0,65 mm erfordert eine entsprechende kleine Zellgröße. Diese hohe Vernetzungsdichte wird zunächst im Bereich der Lenklufteinströmung fortgesetzt, indem eine Volumenbox definiert wird, innerhalb derer eine Kantenlänge im Submillimeterbereich festgesetzt wird. Mit zunehmender Entfernung vom Lenklufteinlass wird auch das Netz sukzessive vergrößert. Dort, wo sich der Strahl unterhalb des Glockentellers bündelt, kommt eine anisotrope, das heißt eine an die Strömungsrichtung angepasste Vernetzung zum Einsatz. In den äußeren Bereichen, in denen die Luft kaum eine Bewegung erfährt, werden sehr grobe Zellen verwendet, um die gesamte Zellzahl und den damit verbunden Rechenbedarf gering zu halten. Geometrieflächen, die direkt angeströmt werden, werden gesondert mit einer Prismenschicht versehen, die die Berechnung in Wandnähe verbessert. Die Prismenschicht ermöglicht eine Auflösung der Grenzschichten, in denen die Zustandsgrößen große Änderungen erfahren. Das gesamte Volumennetz des Segments besitzt rund 1,7 Millionen Zellen. Hier zeigt sich der Vorteil, den

die Ausnutzung der Rotationssymmetrie mit sich bringt. Die Zellersparnis ist enorm. Dem Segmentmodell von 12° und seiner Vernetzung mit 1,7 Millionen Zellen steht das Vollmodell mit theoretisch 51 Millionen Zellen bei gleicher Vernetzungsdichte gegenüber.

4.2 VOLLMODELL

Beim rotationssymmetrischen Segmentmodell handelt es sich um eine vereinfachte Modellierung des Strömungsprozesses. Es wird davon ausgegangen, dass auch die Strömung, die sich ausbildet, rotationssymmetrisch ist. Eine kleine Störung des Strömungsfelds würde diese Annahme jedoch ungültig werden lassen. Außerdem wird davon ausgegangen, dass sich die Strömung unterhalb des Glockentellers ungestört ausbilden und fortsetzen kann. Im tatsächlichen Lackierprozess befindet sich die Zerstäuberglocke für gewöhnlich in einem Abstand von 200 mm bis 300 mm zur Fahrzeugkarosserie, wie bereits erwähnt. In einem Vollmodell soll deshalb das Strömungsfeld ohne Annahme einer Symmetrie und unter Berücksichtigung einer Zielgeometrie im Abstand von 200 mm zur Zerstäuberglocke betrachtet werden. Außerdem wird der Prozess transient berechnet und über 5 s Prozesszeit simuliert. Die übrigen physikalischen Modelle bleiben identisch zu denen des Segmentmodells. Auch beim Vollmodell wird die Luft als ideales Gas betrachtet, um die Zustände am Luftaustritt möglichst prozessgetreu abbilden zu können.

4.2.1 VERNETZUNG DES VOLLMODELLS

Die Vernetzung des Vollmodells wird unter ähnlichen Gesichtspunkten wie zuvor das Segmentmodell gestaltet. Die höchste Vernetzungsdichte befindet sich im Bereich der Lenklufteinströmung, da hier die höchste Prozessdynamik zu erwarten ist. Allerdings ist die absolute Zellgröße höher gewählt, um die gesamte Zellanzahl in einem sinnvollen Rahmen zu halten, da sich die Verfeinerung nicht nur über eine Lenklufbohrung erstreckt wie beim Segmentmodell, sondern über alle Bohrungen des gesamten Lenkluftrings. Die Luftströmung unterhalb des Glockentellers kann sich in diesem Modell nicht frei entfalten, sondern trifft im Abstand von 200 mm auf einen Widerstand in Form einer ebenen Fläche. In Erwartung des sich einstellenden Strömungsprofils wird eine

Art kegelförmiger Bereich als Volumen mit definierter Kantenlänge festgelegt (vgl. Abbildung 4.5).

Das Netz des Vollmodells besitzt eine gesamte Zellanzahl von rund 10 Millionen Zellen.

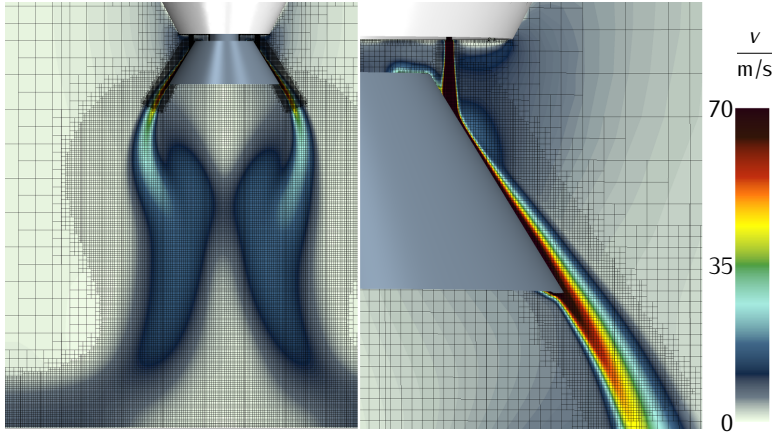


ABBILDUNG 4.5: Getrimmtes Netz des Vollmodells mit Verfeinerungen

4.3 SIMULATIONSERGEBNISSE DER STRÖMUNGSFELDBERECHNUNG

Für die Simulationsergebnisse des Strömungsfelds gibt es keine direkte Validierungsmöglichkeit. Erst im nächsten Zwischenschritt, bei der Simulation des Ebenen-Blech-Modells, wird die Methode über Schichtdickenmessungen validiert.

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse von Segment- und Vollmodell miteinander verglichen. Die Ergebnisse werden im Verlauf des Kapitels am Beispiel drei unterschiedlicher Brushes vorgestellt. Bei allen Brushkonfigurationen handelt es sich um einen BC1 Außenlackierungs-Brush mit einer Glockentellerrotationsgeschwindigkeit von $50\,000\,\text{min}^{-1}$. Es kommt jeweils nur die gerade Lenkluft zum Einsatz mit Luftmengen von $180\,\frac{\text{NL}}{\text{min}}$, $220\,\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ und $350\,\frac{\text{NL}}{\text{min}}$.

Die Luft wird über Bohrungen mit einem Durchmesser von 0,65 mm unter hohem Druck zugeleitet. Wie zuvor beschrieben, wird dieser Bereich sehr fein vernetzt, um die Dynamik unmittelbar am Luftauslass erfassen zu können. Im Segmentmodell kann dieser Bereich sehr viel feiner vernetzt werden als im Vollmodell, bei dem eine solche Verfeinerung jedes einzelnen Luftauslasses die Zellanzahl dramatisch in die Höhe steigen ließe. Die Auswirkungen der Vernetzung werden in Abbildung 4.6 deutlich. Während beim Segmentmodell (A) die am Auslass auftretenden Druckstöße zu erkennen sind, können sie in der Vernetzung des Vollmodells (B) nicht aufgelöst werden. Die Möglichkeit, sehr fein zu vernetzen, ist ein großer Vorteil, den das Segmentmodell mit sich bringt.

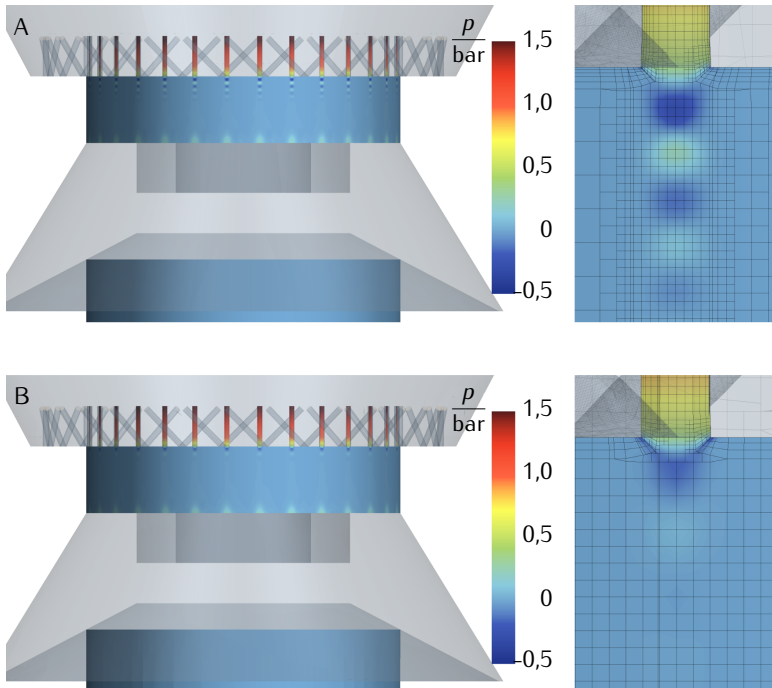


ABBILDUNG 4.6: Vergleich der Druckfelder beim Segmentmodell (A) oben und Vollmodell (B) unten, sowie die jeweilige Vernetzung am Luftauslass bei einer Lenkluftmenge von 350 $\frac{\text{Nl}}{\text{min}}$

Durch den hohen Druck innerhalb der Bohrung und die plötzliche Expansion kühlt sich die Luft stark ab. Da sie sich jedoch sofort mit der Umgebungsluft vermischt, verflüchtigt sich dieser Effekt sehr schnell und hat keine Auswirkungen auf das weitere Prozessgeschehen.

Abbildung 4.7 zeigt die berechneten Strömungsfelder sowie die Geschwindigkeitsverteilungen auf dem Interface für Segment- und Vollmodell. Wie zuvor beschrieben, ist das Segmentmodell so aufgebaut, dass sich die Lenkluft unterhalb des Glockentellers ungestört ausbilden kann. Beim Vollmodell wird ein Strömungshindernis in Form einer ebenen Fläche im Abstand von 200 mm modelliert. Aus diesem Grund sind die im oberen Teil des Bildes dargestellten Strömungsschnitte für Segment- und Vollmodell nicht direkt vergleichbar. Die Strömungsprofile nehmen durch die ebene Fläche eine unterschiedliche Kontur an. Bei der Bewertung beider Modelle gilt es die Frage zu beantworten, welche Rückwirkung die unterschiedlichen Ansätze auf die sich am Interface einstellenden Ergebnisse haben, da diese als Basis für die weiteren Berechnungsschritte dienen. Deshalb werden die Strömungsschnitte selbst zwar beschrieben und analysiert, jedoch nur die im unteren Teil von Abbildung 4.7 dargestellten Interfaces werden bezüglich der Verwendung von Segment- und Vollmodell in einer Gegenüberstellung verglichen.

Die dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten sind in unmittelbarer Nähe des Glockentellers sehr hoch, verlieren jedoch schnell an Energie. Dieser Effekt ist durchaus erwünscht. Die Lenkluft soll zwar den am Glockenteller entstehenden Lacktropfen einen Impuls in Richtung Lackiergut geben. Trifft sie jedoch mit zu viel Energie auf die Oberfläche, können die Lacktropfen parallel zu Oberfläche mitgerissen werden und deponieren nicht wie vorgesehen. Das Strömungsbild des Vollmodell (B) für eine Lenklufteinstellung von $350 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ lässt diesen Effekt erkennen. Sowohl beim Segment- als auch im Vollmodell bündelt sich der Strahl mit zunehmender Lenkluftmenge. Da das Vollmodell eine Fläche im Abstand von 200 mm berücksichtigt, wie es bei einer realen Lackierung der Fall wäre, schafft es der Luftstrahl erst bei höherer Energie sich zu bündeln. Bei einer Lenkluftmenge von $180 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ prallt er auf die Oberfläche und wird breit auseinandergedrückt. Zudem ist zum abgebildeten Zeitpunkt zu erkennen, dass die Strömung nicht symmetrisch verläuft.

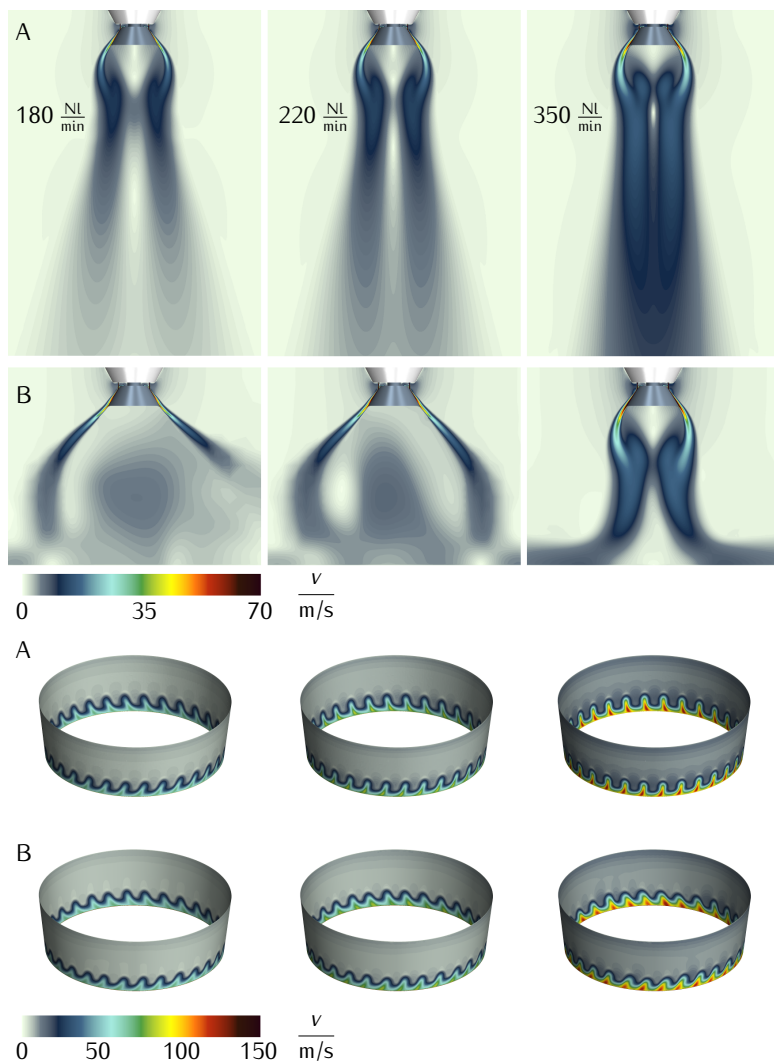


ABBILDUNG 4.7: oben: Simulationsergebnisse der Strömungsfeldberechnung mit Segmentmodell (A) und Vollmodell (B)
 unten: Geschwindigkeitsverteilung am Interface mit Segmentmodell (A) und Vollmodell (B)

Sie „tanzt“ hin und her. Abbildung 4.7 zeigt ein Standbild dieser Bewegung. Erst mit zunehmender Lenkluftmenge stellt sich eine Stabilität ein. Diese Asymmetrie im Strömungsbild kann im Segmentmodell nicht wiedergegeben werden, da lediglich das 12° Segment berechnet und rotationssymmetrisch erweitert wird. Die Strömung ist also durch die geometrische Modellierung zwingend symmetrisch.

Beim Vergleich der beiden Modelle miteinander ist vor allem die Betrachtung der Ergebnisse am Interface von Bedeutung, da diese im nächsten Schritt der Methode als Eingangsgröße dienen (vgl. Abbildung 4.7, unterer Teil). Es ist zu untersuchen, wie sich die Unterschiede in der Modellierung dort auf die Größenverteilungen auswirken. Bei der geringen Lenkluftmenge von $180 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ sind kaum Unterschiede zu erkennen. Bei $220 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ erscheinen die Spitzen der wellenförmigen Verteilung beim Segmentmodell aufgerichtet. Zudem lässt sich beim Vollmodell eine leichte Unregelmäßigkeit in der Anordnung erkennen, die im Segmentmodell auf Grund der Symmetrie nicht wiedergegeben werden kann. Bei der Einstellung mit $350 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ lässt sich dieser Trend noch stärker nachvollziehen. Die Wellenspitzen sind beim Segmentmodell nahezu senkrecht aufgerichtet, während sie beim Vollmodell deutlich schräg verlaufen. Vernachlässigt man die Form der Strömungskontur und betrachtet nur die Einfärbung, welche die Strömungsgeschwindigkeit wiedergibt, so ergibt sich zwischen den beiden Modellen eine gute Übereinstimmung. Die dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten besitzen eine vergleichbare Intensität.

Eine besonders kritische Stelle, die es zu untersuchen gilt, ist die Kante des Glockentellers. Hier lösen sich beim Zerstäubungsvorgang die Lacktropfen vom rotierenden Glockenteller und sollen durch die Lenkluft einen Impuls in Richtung Lackiergut erhalten. Die Strömung hat an der Kante noch eine Geschwindigkeit von rund $60 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. In der Vektordarstellung in Abbildung 4.8 wird die Strömungsrichtung deutlich. Der Einfluss der Glockentellerrotation ist klar erkennbar. An der Oberfläche des Glockenteller wird die Strömung mitgerissen und zeigt in Richtung der Rotation. Wenige Millimeter von der Oberfläche entfernt dominiert die starke Luftströmung der Lenkluft. Ihre Aufgabe ist es, die Lacktropfen, die sich an der Kante bilden, in Richtung Lackiergut zu

transportieren. Unterhalb des Glockentellers ist eine leichte Aufwärtsströmung zu erkennen.

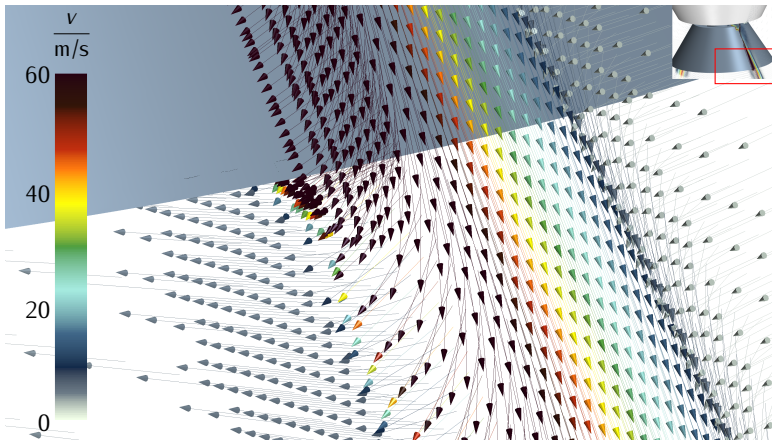


ABBILDUNG 4.8: Vektorielle Ansicht des Strömungsfelds bei einer Lenkluftmenge von $350 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ im Vollmodell

Betrachtet man das Druckfeld, das sich um den Glockenteller herum ausbreitet, zeigt sich, dass sich unterhalb des Glockentellers ein großes Unterdruckgebiet befindet (Abbildung 4.9). Dieses Unterdruckgebiet ist je nach Lenklufteinstellung unterschiedlich stark ausgeprägt. Für die Simulationsergebnisse mit Segmentmodell (A) ist es bei jeder Lenklufteinstellung sichtbar, beim Vollmodell (B) ist es erst für $350 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ deutlich zu erkennen, wenn sich der Sprühkegel stabilisiert hat. Das Unterdruckgebiet, bzw. die damit einhergehende Aufwärtsströmung bergen die Gefahr, dass Lacktropfen nach oben transportiert werden und den Zerstäuber verschmutzen. Wenn diese Lacktropfen bereits angetrocknet sind und sich erneut mit dem ausströmenden Lackfilm vermengen und zur Oberfläche gelangen, können sie zu einem fehlerhaften Lackbild führen.

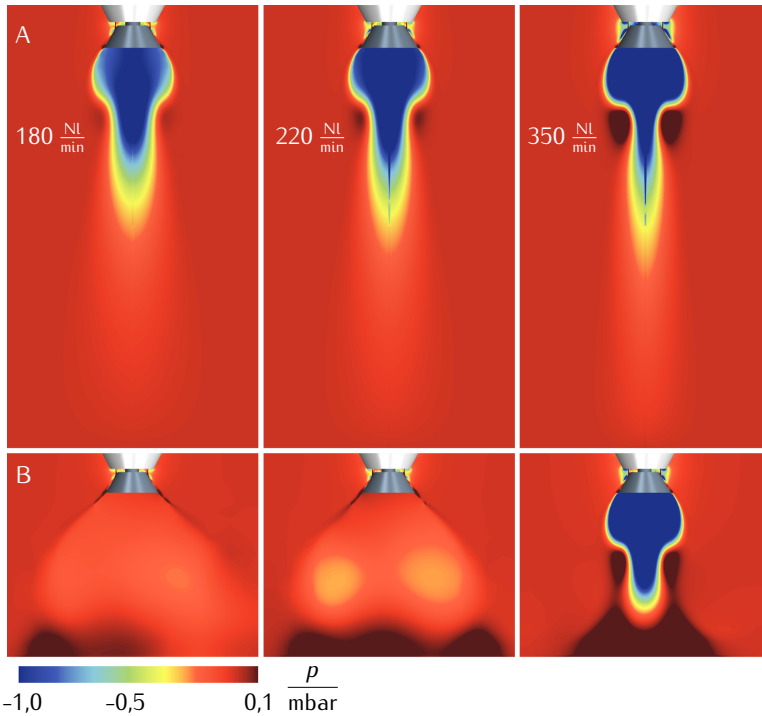


ABBILDUNG 4.9: Simulationsergebnisse der Druckfelder für das Segmentmodell (A) und das Vollmodell (B) bei unterschiedlichen Lenklufteinstellungen

Die Bewertung der beiden Simulationsmodelle gestaltet sich ohne eine Validierung über Realversuche schwierig. Das Segmentmodell entfernt sich insofern von der Realität, als dass durch die Ausnutzung der Symmetrie der Zerstäubergeometrie auch der Strömung eine Symmetrie aufgezwungen wird. Das Vollmodell zeigt, dass diese Annahme nicht völlig korrekt ist, allerdings erscheinen die Abweichungen gering. Auch das Strömungsfeld des Vollmodells ist näherungsweise symmetrisch. Ein entscheidender Vorteil des Segmentmodells ist die Möglichkeit zur sehr feinen Vernetzung, da nur ein Luftauslass betrachtet und vernetzt wird. Beim Vollmodell müssen in Hinblick

auf die Rechenzeit Abstriche bezüglich der Netzauflösung gemacht werden. Die Betrachtung des Druckfelds am Luftauslass verdeutlicht, wie entscheidend die Auflösung in Bereichen mit einer hohen Prozessdynamik ist. Eine tatsächliche Bewertung, welches Simulationsmodell zu bevorzugen ist, lässt sich erst im nächsten Schritt der Simulationsmethode vollziehen, in welchem die Simulationsergebnisse mit Realversuchen verglichen werden.

Ein wichtiger Bestandteil der numerischen Simulation ist die Validierung der entwickelten Methode durch Realversuche, sofern diese zur Verfügung stehen. So kann überprüft werden, ob die physikalischen Prozesse in der Simulation hinreichend genau abgebildet werden und die getroffenen Vereinfachungen zulässig sind. Für die zuvor vorgestellte Berechnung des Strömungsfelds stehen keine Versuchsergebnisse zur Verfügung, anhand derer die Methode validiert werden könnte. Die Simulationsergebnisse können erst gemeinsam mit dem nächsten Schritt auf Plausibilität überprüft werden. Dieser stellt die simulative Abbildung eines realen Technikumsversuchs dar. Die Validierung erfolgt dabei über einen Vergleich der berechneten mit der gemessenen Schichtdicke.

Eine Modellvalidierung auf Basis der Simulationsergebnisse am Gesamtfahrzeug durchzuführen wäre kein guter Ansatz, da die vielen Einflussfaktoren, wie beispielsweise die komplexe Fahrzeuggeometrie, das gleichzeitiges Lackieren mehrerer Roboter sowie die dadurch entstehende gegenseitige Beeinflussung der Zerstäuberglocken, eine Analyse erschweren. Aus diesem Grund wird der Technikumsversuch an einer einfachen Zielgeometrie mit nur einem Zerstäuber durchgeführt. Zunächst werden der Versuchsaufbau im Labor sowie die durchgeführten Messungen beschrieben. Danach wird dieser Versuch in einem Simulationsmodell abgebildet und die simulierten Schichtdicken werden mit den Messungen verglichen.

Wie zuvor beschrieben, werden für den Vergleich Brushkonfigurationen aus der BC1 Außenlackierung gewählt (vgl. Abschnitt 3.1). Abbildung 5.1 zeigt eine Übersicht über den Bereich der verwendeten Brusheinstellungen in diesem Lackierschritt. Die Brushes einer BC1 Außenlackierung verwenden lediglich

die gerade Lenkluft und werden alle mit einer Glockentellerrotationsgeschwindigkeit von $50\,000\text{ min}^{-1}$ betrieben. Obwohl die BC1 Außenlackierung mit Hochspannung durchgeführt wird, werden sowohl Versuche als auch Simulationen mit und ohne Hochspannung durchgeführt, sodass die Modelle getrennt voneinander bewertet werden können.

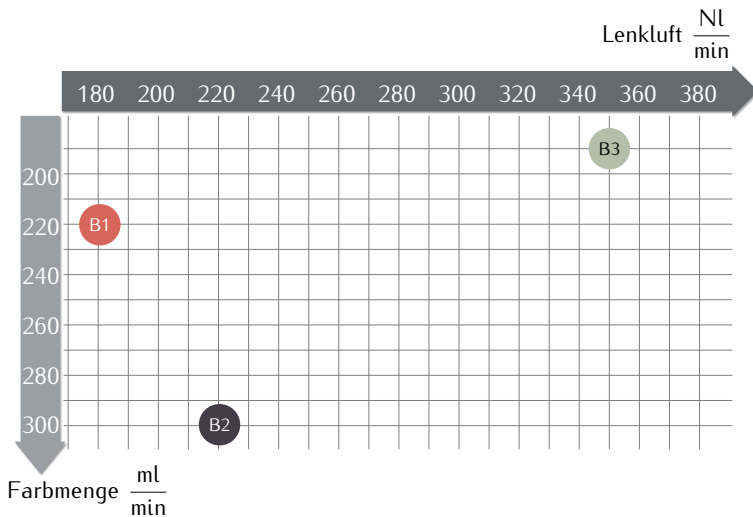


ABBILDUNG 5.1: Die drei exemplarischen Brushes innerhalb der BC1 Außenlackierungs-Brushmatrix

Der Vergleich wird exemplarisch anhand von drei der insgesamt zwölf in der BC1 Außenlackierung verwendeten Brushkonfigurationen vorgestellt. Die übrigen der zwölf Brushkonfigurationen wurden ebenfalls berechnet, sollen jedoch hier nur am Rand erwähnt werden. Die drei Brushes werden ausgewählt, weil sie charakteristische Randpunkte der Brushtabelle (vgl. Abbildung 5.1) darstellen. Die kompletten Einstellungen sind die folgenden:

Lenkluft		gerade	gedrallt	Farbmenge	Drehzahl	Abstand	Spannung
		$\left[\frac{\text{NL}}{\text{min}}\right]$	$\left[\frac{\text{NL}}{\text{min}}\right]$	$\left[\frac{\text{ml}}{\text{min}}\right]$	$[\text{min}^{-1}]$	$[\text{mm}]$	$[\text{kV}]$
B1	180	180	0	220	50000	200	0 / 80
B2	220	220	0	300	50000	200	0 / 80
B3	350	350	0	190	50000	200	0 / 80

TABELLE 5.1: Brusheinstellungen für die drei exemplarischen Brushes

Die benötigten Strömungssimulationen für die Lenklufteinstellungen von $180 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$, $220 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ und $350 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ wurden im Abschnitt 4 zuvor beschrieben.

Neben den Schichtdickenmessungen zur Modellvalidierung werden im Rahmen des Laborversuchs weitere Größen messtechnisch bestimmt, die als Eingangsgrößen in die Simulation einfließen. Dies betrifft vor allem das Lackmaterial, dessen Verhalten in der Simulation über seine Materialparameter beschrieben wird. Neben der Tropfenverteilung, die wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben über Laserbeugungsspektrometrie aufgenommen wird, werden noch der Festkörpergehalt und die Oberflächenspannung des Lacks sowie der Auftragswirkungsgrad ermittelt.

5.1 VERSUCHSAUFBAU IM TECHNIKUM

Die Versuche finden in einem Lackiertechnikum statt, in welchem möglichst die gleichen Umgebungsbedingungen herrschen sollen, wie sie in einer realen Lackierkabine vorzufinden sind. Dafür werden die klimatischen Verhältnisse wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit geregelt. Zudem besitzt das Technikum ähnlich wie die Lackierkabine eine Kabinensinkluft. Als Versuchsträger werden zwei Bleche mit einer Größe von jeweils 500 mm mal 1000 mm nebeneinander positioniert, sodass sich eine zu beschichtende Fläche von 1000 mm mal 1000 mm ergibt. Es wird horizontal beschichtet. Dafür werden die Bleche auf einem Tisch mittig in der Kabine positioniert. Der Zerstäuber lackiert zentriert bahnenweise mit konstantem Abstand zum Blech. Um eine Schichtdicke zu erzielen, die nach Abtrocknung in einer sinnvoll messbaren Größenordnung liegt, wird die Bahn zweimal wiederholt, sodass insgesamt drei Schichten lackiert werden. Anschließend wird die Lackschicht in einem Ofen getrocknet und gehärtet.

5.1.1 SCHICHTDICKENMESSUNGEN

Nach dem Aushärten im Ofen kann die Schichtdicke mittels eines magnet-induktiven Messverfahrens (vgl. Abschnitt 2.2.4) vermessen werden. Für den Abgleich von Messung und Simulation wird eine flächige Auswertung mit einer Messauflösung von 10 mm mal 10 mm gewählt. Die Messung erfolgt computergesteuert auf dem vorgegebenen Messraster. Die Blechgröße sollte entsprechend groß gewählt werden, da Minima und Maxima der Schichtdickenverteilung oft in einer Art Muster auftreten und sich wiederholen. Dadurch können Instabilitäten eines Brushes identifiziert werden. Um sie über die Schichtdickenmessungen erfassen zu können, ist es unzureichend, wenige Profilschnitte über das Blech verteilt auszuwerten. Erst in einer flächigen Auswertung können diese Informationen gewonnen werden. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen. Angenommen sei ein sehr instabiler Sprühstrahl, in dessen Schichtdickenverlauf ein steter Wechsel zwischen rechts- und linkslastiger Beschichtung erfolgt. Würden zufällig alle Messlinien durch linkslastige Profile gelegt, läge die Vermutung nahe, dass der Brush ein konstant linkslastiges Schichtbild erzeugt. Dies ist ein Trugschluss, der möglicherweise zu einer fehlerhaften Bewertung der Simulation führt.

5.1.2 TROPFENGROSSENMESSUNGEN

Neben den Schichtdickenmessungen werden noch weitere Messungen im Rahmen des Laborversuchs durchgeführt. Diese dienen dazu, Daten zu generieren, die als Eingangsgrößen in die Simulation einfließen. Dazu gehören Trofengrößenmessungen, die wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben mittels Laserspektrometrie aufgenommen werden. Während der Messung muss sichergestellt werden, dass die Messoptik nicht verschmutzt. Abbildung 5.2 zeigt den schematischen Aufbau der Messvorrichtung. Der Zerstäuber befindet sich angewinkelt zum Messvolumen, sodass möglichst alle tangential weggeschleuderten Lacktropfen erfasst werden, ohne die Messoptik zu verschmutzen. Dennoch können für die Messung nicht die realen Prozesseinstellungen verwendet werden. Alle Messungen werden mit einer Lenklufteinstellung von $175 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ durchgeführt. Für den Brush B3 mit $350 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bedeutet dies eine große Abweichung, da die Lenkluftmenge maßgeblichen Einfluss auf die Zerstäubung hat. Bei der Be-

wertung der Simulationsergebnisse ist diese Abweichung zu berücksichtigen. Desweiteren werden die Messungen ohne Hochspannung durchgeführt. Es wird jedoch angenommen, dass der Einfluss der Hochspannung auf die Zerstäubung vernachlässigbar ist, da die Tropfen bei ihrer Entstehung zunächst keine Ladung besitzen und diese erst beim Passieren des Ionenfeldes aufnehmen.

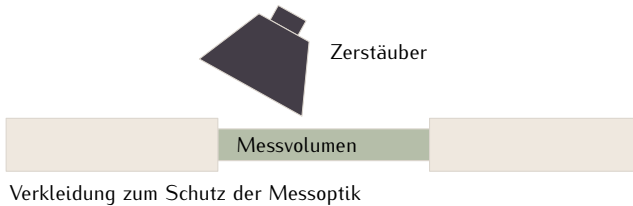


ABBILDUNG 5.2: Aufbau der Tropfengrößenmessung

Abbildung 5.3 zeigt die Tropfengrößenverteilungen für die betrachteten Brushes B1, B2 und B3. Die Tropfengrößenverteilungen für Brush B1 und B3 sind sehr ähnlich. Das feinste Tropfenspektrum weist Brush B3 auf, das größte Brush B2. Ungefähr 80 % der Tropfen von Brush B1 sind kleiner als $30\text{ }\mu\text{m}$. Bei Brush B2 sind es nur 60 %. Brush B2 besitzt außerdem einen höheren Anteil an großen Tropfendurchmessern als die beiden anderen Brushes, die beispielsweise nur einen marginalen Anteil an Tropfen von $90\text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser besitzen. Da alle drei Brushes mit derselben Lenkluftmenge von $175\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ aufgenommen wurden, kann ein direkter Zusammenhang zwischen der Farbmenge und der Tropfengrößenverteilung ausgemacht werden: je höher die verwendete Farbmenge, umso gröber das Tropfenspektrum.

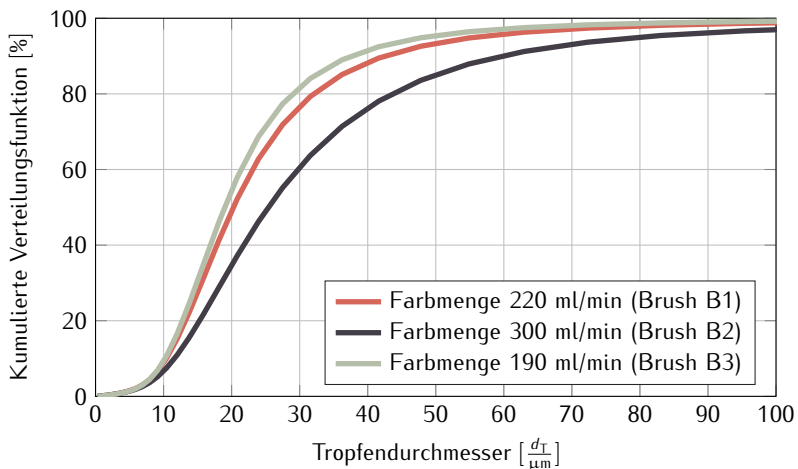


ABBILDUNG 5.3: Tropfengrößenverteilungen für Brushes B1, B2 und B3

5.1.3 ERMITTELN DES FESTKÖRPERGEHALTS

Nach Abtrocknung und Aushärtung bleiben lediglich die nichtflüchtigen Anteile (nfA) des Lacks zurück. Der Festkörpergehalt im Lack kann entweder bezogen auf die Masse (nfA) oder auf das Volumen (VnfA) angegeben werden.

Das Vorgehen zur Ermittlung dieser Materialgrößen ist in DIN EN ISO 3251:2008-06 (DIN EN ISO 3251:2008-06) für die massenspezifische Angabe und in DIN EN ISO 3233-2:2014-10 (DIN EN 3233-2:2014-10) für die volumenspezifische Angabe beschrieben. Die Verwendung dieses Wertes in der Simulation wird in Abschnitt 6.2 diskutiert.

5.1.4 BESTIMMUNG DES AUFTRAGSWIRKUNGSGRADS ÜBER WIEGEN

Neben dem Vergleich der Beschichtungsergebnisse aus Messung und Simulation soll auch der Auftragswirkungsgrad untersucht werden. Er liefert eine Bewertung für die Effizienz des Beschichtungsvorgangs (vgl. Abschnitt 2.2.3). Er berechnet sich aus dem Verhältnis der tatsächlich deponierten zur insgesamt versprühten Lackmasse (Gleichung 2.1).

Um ihn im Versuch zu ermitteln, wird der Versuchstisch mit einer Alufolie bespannt. Deren Nettogewicht ist im Vorfeld zu ermitteln. Die Alufolie wird dann mit den gleichen Prozesseinstellungen beschichtet, wie die Versuchsbleche zuvor. Nach der anschließenden Behandlung im Ofen kann über ein abermaliges Wiegen das Gewicht der deponierten Lackschicht ins Verhältnis gesetzt werden zur versprühten Lackmenge. Die Versuchsergebnisse aus der Auftragswirkungsgradbestimmung werden in Abschnitt 6.3 vorgestellt in der Gegenüberstellung von Simulations- und Messergebnissen.

6

NUMERISCHE SIMULATION DES TECHNIKUMSVERSUCHS

Während es sich beim Strömungssegmentmodell um eine reine Strömungssimulation handelt, ist das sogenannte Ebene-Blech-Modell, welches den Technikumsversuch abbildet, ein komplexes Mehrphasenströmungsmodell, das die Physik des realen Lackierprozesses genauso wiedergeben soll, wie die Simulation des Gesamtfahrzeugs später (vgl. Abschnitt 3.3). Die Vereinfachungen sind hier lediglich in der Zielgeometrie und im Bewegungsablauf zu finden sowie in der Reduktion auf einen einzigen Zerstäuber. Das Ziel des Ebenen-Blech-Modells ist die Modellvalidierung und gegebenenfalls -korrektur anhand von Technikumsversuchen. Wenn die Ergebnisse des Simulationsmodells eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen zeigen, können die Modelleinstellungen auf das Fahrzeugmodell übertragen werden (vgl. Abbildung 1.3). Eine optimale Vorbereitung für den Simulationsprozess der Deckkabine ist die digitale Abbildung der gesamten Brushtabelle eines Lackierschritts im Ebenen-Blech-Modell sowie eine Abstimmung mit Versuchen. Kann dies nicht gewährleistet werden, so sollten zumindest charakteristische Eckpunkte der Tabelle berechnet und abgeglichen werden. Diese Eckpunkte sind in Tabelle 5.1 definiert.

6.1 GEOMETRISCHES MODELL UND VERNETZUNG

Abbildung 6.1 zeigt das geometrische Modell des Laborversuchs. Beschichtet wird ein 2,5 m langes und 1 m breites Blech, das sich in einem 3,5 m langen, 3 m breiten, 2,7 m hohen Quader befindet. Der Abstand des Blechs zur Decke

beträgt 1,9 m, der Abstand zu den Seitenwänden beträgt jeweils 1 m. Für die digitale Abbildung des Technikumsversuchs wäre es denkbar, das Rechengebiet als deutlich kleineren Quader zu modellieren, dessen Boden das Blech darstellt. An dieser Stelle wird das Rechengebiet jedoch bewusst in dieser Größe definiert, um einerseits die Kabinensinkluft und deren Umströmung des Blechs berechnen zu können. Andererseits soll für den Fall mit aktivierter Hochspannung gewährleistet werden, dass sich das E-Feld ausbilden kann und auch ein eventueller Umgriff an der Blechkante abgebildet wird. Die Decke des Quaders erhält eine Dirichlet-Randbedingung mit der Geschwindigkeit der Kabinensinkluft. Der Boden, an dem sich in der Realität die Auswaschung befindet, wird als Druckauslass definiert.

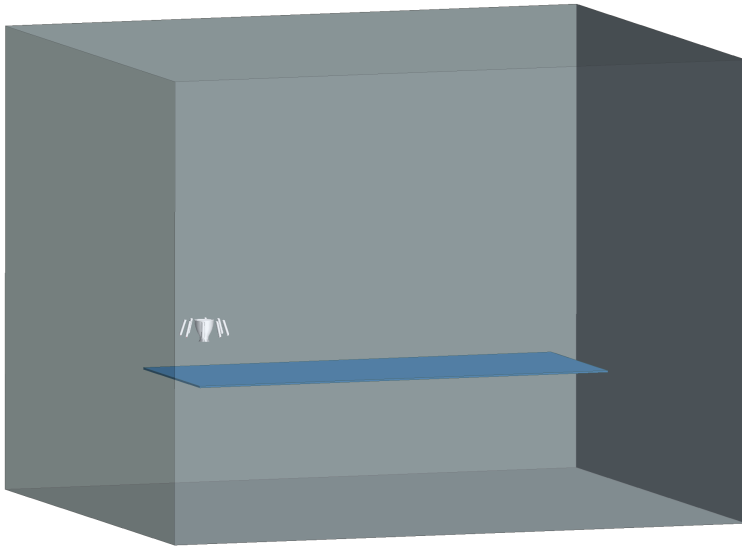


ABBILDUNG 6.1: Geometrisches Modell des Technikumsversuchs

Die zuvor ermittelten Informationen des Strömungsfeldes werden am Zerstäuber als Randbedingung eingebracht. Dazu wird das Interface, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, als Geometriefläche gesetzt. Der Lenkluftring, der die Lenkluftbohrungen enthält, entfällt. Während beim Strömungssegmentmodell lediglich der Glockenteller und ein Teil des Gehäuses modelliert werden, werden im

nächsten Schritt für den Fall mit Außenaufladung auch die Aufladeeinrichtung samt Aufladungselektroden abgebildet.

In Abschnitt 3.1 werden verschiedene Ansätze simulativer Abbildungen des Lackierprozesses vorgestellt. Eine besondere Schwierigkeit ist die Umsetzung der Zerstäuberbewegung. Das liegt vor allem daran, dass bei einer Bewegung theoretisch neu vernetzt werden müsste. Oft wird deshalb lediglich ein statischer Zerstäuber simuliert und die dynamische Schichtdicke über Integration berechnet. In der hier verwendeten Software wird die Problematik eines bewegten Netzes über das Chimeraverfahren (auch Overset-Mesh) gelöst (vgl. FERZIGER und PERIĆ [2008]). Dabei überlappen sich zwei völlig eigenständige Diskretisierungsnetze, die beliebig übereinander verschoben werden können. Für die Simulation des Lackierprozesses bestehen diese Netze aus einem Hintergrundnetz und der Overset-Region (vgl. Abbildung 6.2).

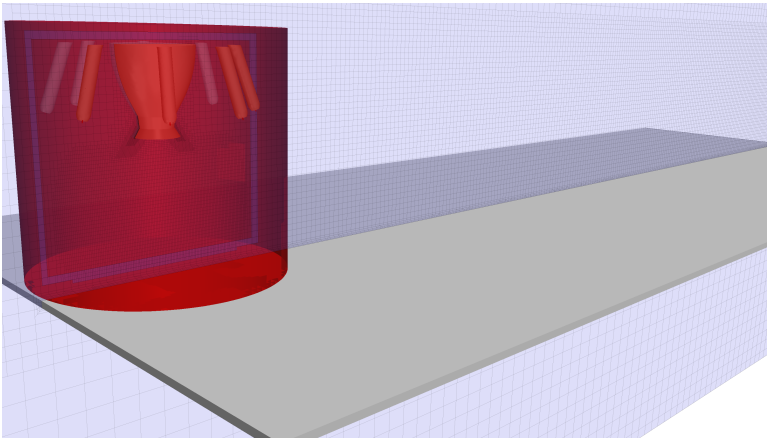


ABBILDUNG 6.2: Overset-Region

Das Hintergrundnetz umfasst das komplette Rechengebiet, also den zuvor beschriebenen Quader sowie das zu beschichtende Blech. Bei der Overset-Region handelt es sich um einen Zylinder, der den kompletten Zerstäuber samt Elektroden umgibt. Während der Bewegung der Overset-Region wird das Netz mit dem Hintergrundnetz verschnitten, weshalb die Zellgröße an

den Rändern in der gleichen Größenordnung liegen sollte. Der entscheidende Vorteil des Chimeraverfahrens ist, dass während der gesamten Laufzeit mit den ursprünglichen Netzen gearbeitet werden kann. Es bedarf keiner Neuvernetzung, welche besonders bei der großen Zellanzahl einen enormen Anstieg der Rechenzeit zur Folge hätte.

Die Zellgröße an der Blechoberfläche beträgt 10 mm, was der Auflösung des Messrasters der magnetinduktiven Schichtdickenmessung entspricht. Für das Ebene-Blech-Modell wäre eine feinere Vernetzung mit vertretbarem Rechenaufwand denkbar. In Hinblick auf das Fahrzeugmodell allerdings wird mit der gleichen Zellgröße gearbeitet, wie sie auch später verwendet werden soll. Ähnlich wie bei der Strömungsberechnung werden die Bereiche der Lenkluftströmung mit einer geringen Zellgröße vernetzt, sodass die Prozessdynamik an diesen Stellen erfasst werden kann. Da die Einströmung der Lenkluft durch das eingesetzte Interface entfällt und sich dieses weiter stromabwärts befindet, muss der Zerstäuber im Ebenen-Blech-Modell nicht in der Feinheit vernetzt werden wie zuvor. Auch der Bereich, in dem sich die zylindrische Overset-Region bewegt, wird gegenüber dem übrigen Hintergrundnetz verfeinert, sodass die Anforderung einer gleichen Zellgröße an den Rändern der überlappenden Netze erfüllt wird.

6.2 PHYSIKALISCHE MODELLIERUNG

Die mathematischen Grundlagen für Zweiphasenströmungen werden in Abschnitt 3.3 beschrieben. Neben der Luft als kontinuierlicher Fluidphase müssen auch die Lackpartikel und ihre Bewegungen in der Luftströmung sowie die auftretenden Interaktionen beschrieben werden. Der vom Hochrotationszerstäuber erzeugte Lacknebel wird nicht als Kontinuum betrachtet, sondern als disperse Phase, die sich aus einer großen Anzahl kleinster Partikel zusammensetzt. Die Partikel werden in der Simulation in sogenannten *Parcels* zusammengefasst. Dabei handelt es sich um Pakete, die Partikel in sich bündeln, welche dieselben physikalischen Eigenschaften besitzen. Die Bewegungsgleichungen (Gleichung 3.10) werden für die *Parcels* und nicht für jeden einzelnen Partikel gelöst. Dieses Konzept kann ebenfalls als eine Form der Diskretisierung der Partikeldichte gesehen werden. Das Ziel dabei ist es, die benötigte Rechen-

zeit zu verkürzen, gleichzeitig jedoch den statistischen Informationsgehalt beizubehalten.

In der Berechnung des Strömungssegmentmodells liegt der Fokus auf der Wiedergabe der im Bereich der Luftausströmung auftretenden gasdynamischen Effekte. Da diese kritische Region durch die Verwendung des Interfaces im Ebenen-Blech-Modell vermieden werden kann, wird die Luft nicht weiterhin als ideales Gas implementiert. Es wird vereinfachend eine konstante Luftdichte angenommen. Die Interaktionen zwischen der Fluidphase und der dispersen Phase werden über eine Zwei-Wege-Kopplung beschrieben (vgl. Abbildung 3.1). Die zuvor in den Versuchen ermittelten Lackgrößen werden nun bei der Definition der Lagrange-Phase verwendet.

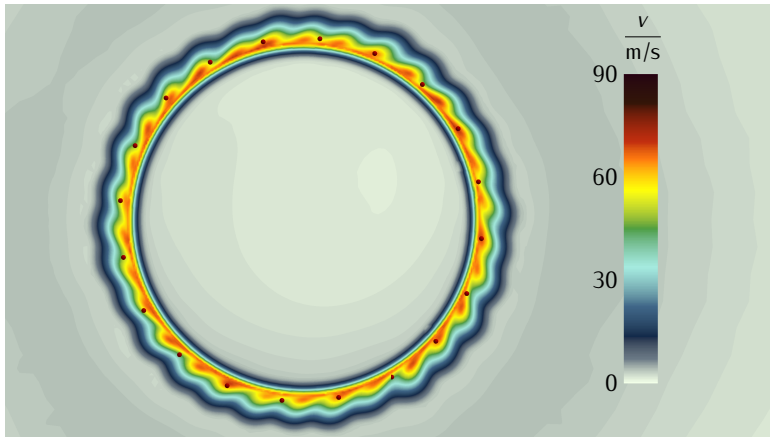


ABBILDUNG 6.3: Verteilung der 20 Punkte für die Tröpfcheninjektion

Eine der wichtigsten Eingangsgrößen ist die gemessene Partikelgrößenverteilung. Dicht unterhalb des Glockentellers werden 20 diskrete Punkte definiert, an denen die Lackpartikel in das Rechengebiet eingebracht werden. Um den Injektionspunkten eine stochastische Verteilung zu geben, werden sie in jedem Zeitschritt um 7° rotiert. Um ungewollte Regelmäßigkeiten in den Positionen der Injektionspunkte zu vermeiden, wird an dieser Stelle bewusst eine Primzahl verwendet, die nicht in der Primfaktorzerlegung von 360° vorkommt, sodass die Punkte erst nach zahlreichen Umdrehungen wieder auf

die gleiche Stelle fallen. Damit wird umgangen, dass die Injektionspunkte sich ständig an derselben Position befinden und denselben Einfluss durch die Lenkluftströmung erfahren (vgl. Abbildung 6.3). Eine solche symmetrische Wahl der Injektionspunkte hätte großen Einfluss auf die Tropfenbahnen und damit auf die resultierende Schichtdicke.

Es wird angenommen, dass die gemessene Tropfengrößenverteilung den finalen Zustand des Zerfalls repräsentiert. Diese Annahme liegt darin begründet, dass die Laserbeugungsmessung in einem gewissen Abstand zur Glockentellerkante durchgeführt wird und der Zerfall zu diesem Zeitpunkt größtenteils abgeschlossen ist. Da das Gleichungssystem der Lagrange-Phase zu jedem Zeitschritt der Berechnung gelöst werden muss, ist die Anzahl der aktiven Parcels ein signifikanter Faktor für die benötigte Rechenzeit. Gleichzeitig ist sie aber auch ein Maß für die Wiedergabegenauigkeit der Tropfengrößenverteilung. Damit Tropfen, die das Blech nicht erreichen, keine weitere Rechenzeit in Anspruch nehmen, wird an den Wänden eine entsprechende Randbedingung definiert. Sobald die Lagrange-Partikel auf eine Wand treffen, werden sie gelöscht.

Treffen die Parcels auf dem zu lackierenden Blech auf, wird ihr Volumen zur Schichtdicke in der entsprechenden Zelle addiert. Dabei wird die Lackschicht nicht tatsächlich als Film modelliert, sondern ist lediglich eine skalare Größe. Die Schichthöhe einer Zelle berechnet sich wie folgt:

$$t_{\text{Zelle}} = \frac{V_{\text{P}}}{A_{\text{Zelle}}} \quad (6.1)$$

mit V_{P} : Partikelvolumen,
 A_{Zelle} : Grundfläche einer Zelle.

Soll eine tiefergehende Betrachtung der Dynamik der Lackschicht selbst erfolgen, muss für die Modellierung des Lackfilms ein Fluidfilm-Modell verwendet werden. In diesem Fall wird darauf verzichtet, um das Simulationsmodell schlank zu halten. Ein Fließen im Lackfilm kann dadurch nicht berücksichtigt werden. Um trotzdem einen Rückschluss auf Defekte wie Läufer treffen zu können, werden in der Auswertung Dokumentationen zu Sollschichtdicken zu Rate gezogen. Sollte die Toleranz dieser Sollschichtdicken überschritten werden, kann ein Simulationsmodell aufgesetzt werden, das lediglich die kritischen Bereiche umfasst. Die Lackschicht wird dann über ein Fluidfilm-Modell

definiert, sodass auch die Dynamik im Film untersucht und eventuelle Läufer vorhergesagt werden können.

Die nach Gleichung 6.1 ermittelte Schichtdicke beschreibt die nasse Lackschicht auf dem Blech. Für den Vergleich mit der Messung ist es nötig, die Trockenschichtdicke zu kennen. Hierzu wird der messtechnisch ermittelte Volumenfestkörperanteil (V_{nfA}) des Lacks verwendet. In der Annahme, dass nach Abtrocknen und Aushärten der Lackschicht lediglich der nichtflüchtige Anteil des Lacks zurückbleibt, wird die Trockenschichtdicke berechnet über:

$$t_{\text{trocken}} = V_{nfA} t_{\text{nass}} \quad (6.2)$$

mit V_{nfA} : auf das Volumen bezogener nichtflüchtiger Anteil.

Die über diese Gleichung ermittelte Schichtdicke kann direkt mit der gemessenen Schicht verglichen werden.

6.3 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Als Simulationsergebnisse werden an dieser Stelle zunächst Berechnungen des Ebenen-Blech-Modells ohne Hochspannung vorgestellt und mit den entsprechenden Messungen verglichen.

Bei der Bewertung der Simulationsergebnisse spielt vor allem die korrekte Abbildung der Schichtdicke auf dem Blech eine Rolle. Sie wird mit der gemessenen Schichtdicke aus den Technikumsversuchen verglichen.

Bei der Auswertung werden sowohl die Ergebnisse der Messung als auch die der Simulation in einem Oberflächenplot dargestellt und miteinander verglichen. Außerdem werden in Profilschnitten der maximale und der minimale Verlauf der Messung gezeigt, sowie eine Mittelung aller Profilschnitte. Diese Mittelung wird auch für die Simulation vorgenommen. Ziel der so gewählten Darstellung ist es, Messung und Simulation auf einen Blick vergleichbar zu machen. Durch die Darstellung von Minimal- und Maximalverläufen wird auch die Unregelmäßigkeit im Sprühbild berücksichtigt. Minimum und Maximum der Messung bilden dabei den Zielkorridor, in dem sich die gemittelte Kurve der Simulation befinden soll.

6.3.1 BEWERTUNG DES SEGMENT- UND VOLLMODELLS ALS BASIS FÜR DIE EBENE-BLECH-BERECHNUNG

Bevor die Simulationsergebnisse der drei Brushkonfigurationen bewertet werden, wird zunächst der Einfluss des gewählten Strömungsmodells untersucht. In den Abschnitten 4.1 und 4.2 werden zwei unterschiedliche Modelle für die Berechnung des reinen Strömungsfelds vorgestellt. Das Segmentmodell nutzt die Rotationssymmetrie der Glockentellergeometrie aus, sodass nur ein 12° Segment berechnet wird. Es benötigt trotz feiner Netzauflösung nur eine geringe Rechenzeit. Beim Vollmodell werden der gesamte Glockenteller sowie ein Strömungshindernis in 20 cm Entfernung modelliert, um eine große Prozessnähe beizubehalten. Dies geschieht zu Lasten der Netzauflösung und der Rechenzeit.

Die Berechnungsergebnisse werden am Beispiel von Brush B2 gegenübergestellt. Abbildung 6.4 zeigt die berechnete Schichtdicke am Ebenen-Blech-Modell in der Gegenüberstellung von Segment- und Vollmodell. Eine rein visuelle Bewertung lässt keine Unterschiede der beiden Schichtaufträge erkennen. Sie besitzen die gleiche Breite sowie das gleiche Muster.

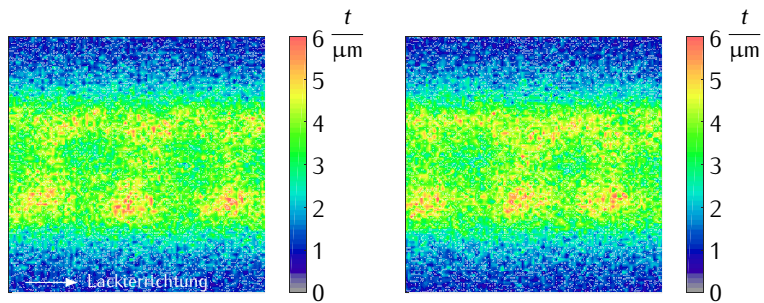


ABBILDUNG 6.4: Simulierte Schichtdicke am ebenen Blech für Brush B2, Strömung auf Basis des Segmentmodells (links) und des Vollmodells (rechts)

Als weiterer Vergleich werden die Auftragswirkungsgrade der zwei Beschichtungssimulationen betrachtet. Sie werden nach Gleichung 2.1 berechnet und sind in Tabelle 6.1 zu finden.

	Segmentmodell	Vollmodell
B2	69 %	69 %

TABELLE 6.1: Vergleich Auftragswirkungsgrad der Beschichtung, Strömung auf Basis des Segmentmodells bzw. Vollmodells

Beide Simulationsmodelle besitzen nach Rundung auf volle Prozentzahlen einen Auftragswirkungsgrad von $\eta_A = 69\%$.

In der Bewertung der beiden Ansätze auf Basis des berechneten Schichtdickenprofils und des berechneten Auftragswirkungsgrads zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse. Eine Gegenüberstellung von Simulations- und Messergebnissen wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

Der Vergleich von Segment- und Vollmodell zeigt, dass es bei Betrachtung der Simulationsergebnisse kaum Unterschiede zwischen den Ansätzen gibt. Obwohl beim Strömungssegmentmodell von einem rotationssymmetrischen Strömungsfeld ausgegangen wird und kein Strömungshindernis modelliert wird, entsprechen die Ergebnisse denen des Vollmodells, das eine stärkere Prozessnähe besitzt. Die Ergebnisse rechtfertigen den Einsatz des Segmentmodells, mit dem trotz feiner Netzauflösung die benötigte Rechenzeit reduziert werden kann.

6.3.2 AUSWERTUNG ERGEBNISSE BRUSH B1 – OHNE HOCHSPANNUNG

Brush B1 besitzt mit $180 \frac{\text{nl}}{\text{min}}$ Luftmenge und $220 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$ Farbmenge eine sehr geringe Intensität und markiert bezogen auf beide Parameter das untere Ende der Brushmatrix (vgl. Abbildung 5.1). Der Brush wird damit relativ breit mit einem sehr geringen Farbauftrag.

Abbildung 6.5 zeigt die Schichtdickenergebnisse aus Simulation und Messung. Wie zuvor beschrieben (vgl. Abschnitt 5.1) werden im Versuch drei Bahnen beschichtet, um eine messbare Schichtdicke zu erzielen. Es wird angenommen, dass die Schichtdicke bei jeder Bahn linear anwächst, sodass die gemessene Schichtdicke gedrittelt wird, um sie mit der Simulation vergleichen zu können. Für die leichtere Handhabung werden in den Versuchen zwei Bleche mit jeweils 500 mm Länge und 1000 mm Breite verwendet. Zudem kann die erste Messbahn erst 25 mm von der Kante entfernt erfolgen, sodass in der Mitte eine Unterbrechung von 50 mm zu sehen ist.

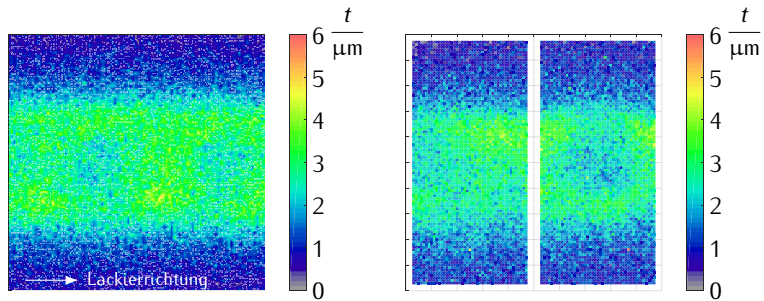


ABBILDUNG 6.5: Brush B1 – Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts)

Der visuelle Vergleich zwischen Simulation und Messung zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Breite des Schichtauftrags ist vergleichbar, auch das Muster der Messung ist in der Simulation zu erkennen. Die berechnete Schichtdicke erscheint etwas kräftiger als die gemessene. Sowohl in der Simulation als auch in der Messung sind deutliche Schwankungen in der Schichtdicke zu erkennen, die auf einen instabilen Sprühstrahl schließen lassen. Auf dem ersten Blech der Messung ist die Schicht auf der linken Seite in Lackierrichtung höher als auf der rechten Seite. Beim zweiten Blech ist dieser Effekt umgedreht. Das Schichtbild der Simulation ist diesbezüglich gleichmäßiger.

Die Profilschnitte werden sowohl für die Simulation als auch für die Messung alle 10 mm durchgeführt und anschließend gemittelt (vgl. Abbildung 6.6). Die Mittelwertkurven von Simulation und Messung besitzen eine sehr gute Übereinstimmung. Die gepunkteten Kurven zeigen den Verlauf der Maximal- und Minimalwerte der Messung. Diese Minimal- und Maximalwerte bilden einen Zielkorridor, in dem das Simulationsergebnis liegen soll. Der Zielkorridor kann auch als Maß für die Stabilität der Lackierung gesehen werden. Gibt es große Schwankungen in der Schichtdicke, schlagen sich diese in einem breiten Zielkorridor nieder. Der Übersichtlichkeit halber wird die Betrachtung der Minimal- und Maximalkurven nur für die Messung abgebildet.

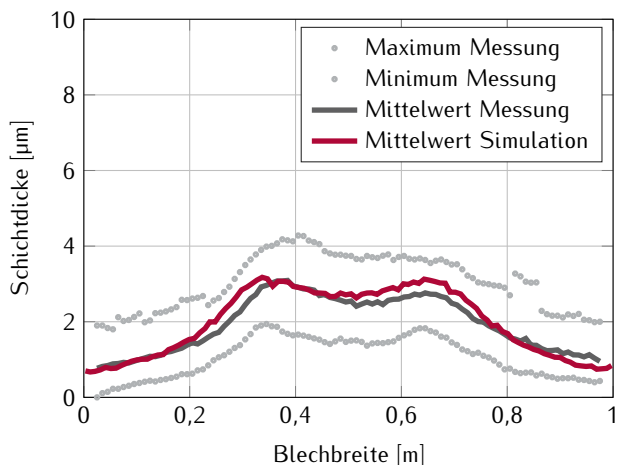


ABBILDUNG 6.6: Brush B1 – Profilschnitte von Simulation und Messung im Vergleich

In Tabelle 6.2 sind die Auftragswirkungsgrade für Simulation und Messung aufgeführt. Der Unterschied, der sich im Schichtdickenplot (vgl. Abbildung 6.5) zeigt, ist auch hier wiederzufinden. Die Simulation besitzt einen höheren Auftragswirkungsgrad als die Messung. Diese Abweichung wird jedoch als sehr gering bewertet, was auch die Profilschnitte bestätigen. Insgesamt stellt die Simulation von Brush B1 eine sehr gute Wiedergabe der Messung dar. Da auch Messungen mit einer Ungenauigkeit behaftet sind, ist eine weitere Optimierung der Simulation nicht sinnvoll. Bei der bereits vorhandenen Übereinstimmung würde eine weitere Anpassung an die Messung lediglich in einer Abbildung des Messfehlers resultieren.

	Simulation	Messung
AWG B1	70 %	62 %

TABELLE 6.2: Brush B1 – Auftragswirkungsgrade der Simulation und der Messung

6.3.3 AUSWERTUNG ERGEBNISSE BRUSH B2 – OHNE HOCHSPANNUNG

Brush B2 wird mit einer Lenkluftmenge von $220 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ und einer Farbmenge von $300 \frac{\text{mL}}{\text{min}}$ betrieben. Damit besitzt die Brushkonfiguration die stärkste Farbmengeneinstellung aller drei betrachteten Brushes. Die Tropfengrößenverteilung wurde in der Messung mit einer Luftmenge von $175 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ aufgenommen. Dies stellt eine deutliche Abweichung zur realen Prozesseinstellung dar. Dennoch zeigen Simulation und Messung eine sehr gute Übereinstimmung im Schichtdickenbild (vgl. Abbildung 6.7). Die Breite des Auftrags ist nahezu identisch. Auch die Größenordnung der Schichtdickenverteilung ist die gleiche. In der Messung ist das Erscheinungsbild des Schichtauftrags unregelmäßiger als es in der Simulation der Fall ist. Die Ursache hierfür könnte in Schwankungen im realen Prozess liegen, die in der Simulation nicht wiedergegeben werden, wie beispielsweise Druckschwankungen in der Luftzufuhr oder Störungen in der Kabine.

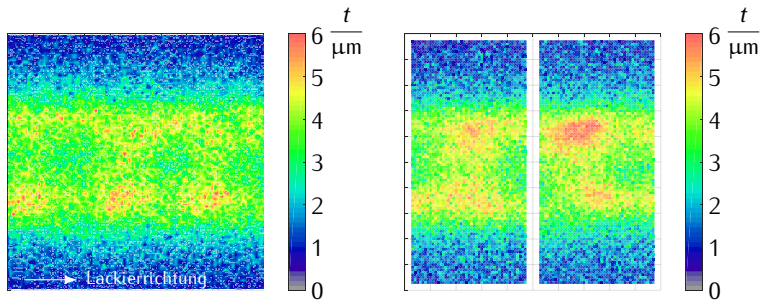


ABBILDUNG 6.7: Brush B2 – Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts)

Bei der Betrachtung der Profilschnitte besitzt der Schichtauftrag der Simulation eine Tendenz zur Rechtslastigkeit, die Messung zur Linkslastigkeit (vgl. Abbildung 6.8). Quantitativ liegen die Kurven sehr gut übereinander. Die Auftragswirkungsgrade (vgl. Tabelle 6.3) sind für diesen Brush sogar identisch. Zusammenfassend wird die Messung von Brush B2 ebenfalls sehr gut über die Simulation wiedergegeben.

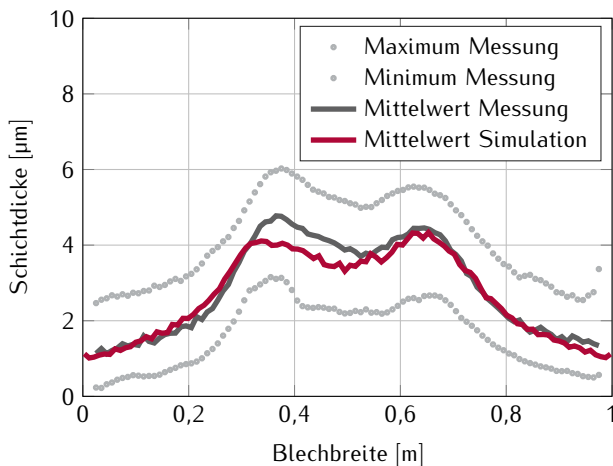


ABBILDUNG 6.8: Brush B2 – Profilschnitte von Simulation und Messung im Vergleich

	Simulation	Messung
AWG B2	69%	69%

TABELLE 6.3: Brush B2 – Auftragswirkungsgrade der Simulation und der Messung

6.3.4 AUSWERTUNG ERGEBNISSE BRUSH B₃ – OHNE HOCHSPANNUNG

Brush B3 besitzt mit $350 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ eine sehr hohe Lenklufteinstellung bei einer relativ geringen Farbmenge von $190 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$. Die Lenklufteinstellung ist damit fast doppelt so hoch wie die Einstellung, mit der die Tropfengrößenmessungen ($175 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$) durchgeführt wurden.

Bei der Betrachtung der Schichtdickenergebnisse in Abbildung 6.9 zeigt sich vor allem in der Schichtbreite eine Abweichung von der Simulation zur Messung. Der Auftrag im Realversuch ist deutlich schmaler.

Dies bestätigt sich auch in den Profilschnitten von Messung und Simulation (vgl. Abbildung 6.10). Zwar liegen die maximalen Schichthöhen der Mittelwertkurven nicht weit auseinander. Der berechnete Schichtauftrag weist jedoch eine andere Charakteristik auf als der gemessene. Auch hier zeigt sich, dass der berechnete Auftrag deutlich breiter ist. Dennoch liegt der gemittelte

Profilschnitt der Simulation fast innerhalb des Zielkorridors der Messung. Die Auftragswirkungswerte weichen mit 79 % für die Simulation und 66 % für die Messung ebenfalls von einander ab (vgl. Tabelle 6.4).

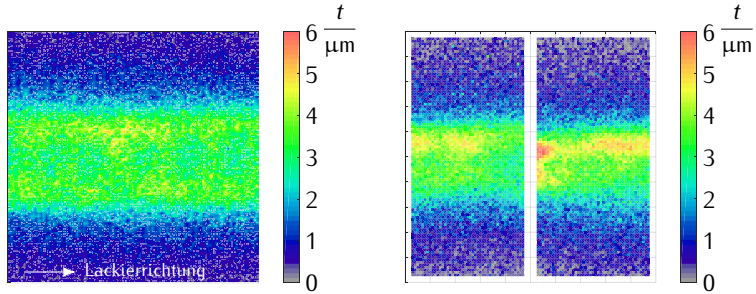


ABBILDUNG 6.9: Brush B3 – Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts)

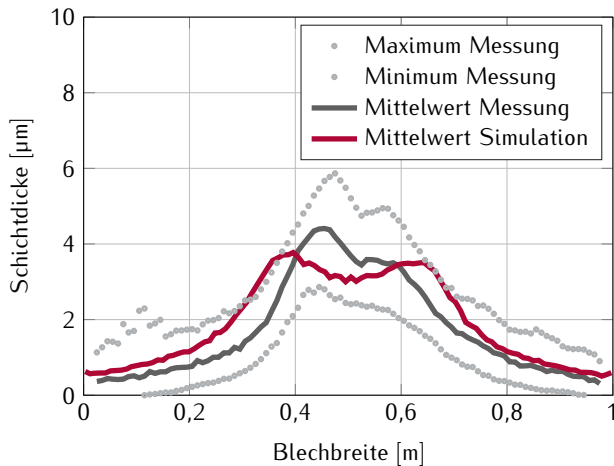


ABBILDUNG 6.10: Brush B3 – Profilschnitte von Simulation und Messung im Vergleich

Die auftretenden Abweichungen zwischen Simulation und Messung für den Brush B3 werden nicht als Fehler im Modell bewertet. Die Ursache, weshalb

die Simulationsergebnisse von Brush B3 eine geringere Qualität aufweisen als die Ergebnisse der beiden anderen Brushes, wird viel mehr in der zu prozessfernen Ermittlung der Tropfengrößenverteilung gesehen. Wie zuvor beschrieben (vgl. Abschnitt 5.1.2), können die Tropfengrößenmessungen nicht mit den realen Lenklufteinstellungen durchgeführt werden. Bei allen Messungen wird der Zerstäuber mit einer Lenklufteinstellung von $175 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ betrieben. Für den Brush B3, der eine Lenkluftmenge von $350 \frac{\text{NL}}{\text{min}}$ besitzt, bedeutet dies eine starke Abweichung. Da die beiden anderen vorgestellten Simulationen für Brush B1 und Brush B2 eine Übereinstimmung mit der Messung aufweisen, wird davon ausgegangen, dass das Modell generell eine gute Abbildung des realen Prozesses darstellt und die Abweichungen in der Simulation von Brush B3 auf die fehlerbehafteten Eingangsgrößen zurückzuführen sind.

	Simulation	Messung
AWG B3	79 %	66 %

TABELLE 6.4: Brush B3 – Auftragswirkungsgrade der Simulation und der Messung

6.3.5 ZUSAMMENFASSUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE AM EBENEN BLECH OHNE HOCHSPANNUNG

Für die Berechnung des Ebenen-Blech-Modells, bei dem ein realer Technikumsversuch abgebildet und mit Messungen verglichen wird, werden drei Brushes der Brushmatrix der BC1 Außenlackierung vorgestellt. Diese markieren bezogen auf ihre Einstellungen bezüglich Lenkluftmenge und Farbmenge Randpunkte der Matrix.

Für zwei der drei Brushes weisen die Simulationsergebnisse ohne Hochspannung eine sehr gute Übereinstimmung auf. Lediglich für Brush B3, der eine sehr hohe Lenklufteinstellung besitzt, weichen die Ergebnisse von den Messungen ab. Die Ursache wird jedoch nicht in der Modellierung gesehen, sondern in den beschränkten Möglichkeiten bei der Tropfengrößenmessung (vgl. Abschnitt 5.1). Die Ungenauigkeit in der Tropfengrößenverteilung, die als Eingangsgröße der Simulation fungiert, wirkt sich auf die berechnete Schichtdicke aus. Die Abweichungen liegen in einem noch akzeptablen Rahmen. Die Mittelwertkurve der Simulation liegt fast vollständig im Zielkorridor der Messung.

Die Simulationen der beiden anderen Brushes B1 und B2, deren Lenklufteinstellung im Prozess nur gering von der Einstellung während der Tropfengrößenmessung abweicht, erzielen eine äußerst gute Übereinstimmung mit der Messung. Dieses Verhalten kann auch bei den übrigen der zwölf Brushes der Brushmatrix, die hier nicht im einzelnen vorgestellt werden, beobachtet werden. Generell zeigt die Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messungen, dass die entwickelte Methode zur Simulation des Lackierprozesses am ebenen Blech ohne Hochspannung gut geeignet ist. Im nächsten Schritt werden analog die Ergebnisse mit Hochspannung untersucht.

6.3.6 AUSWERTUNG ERGEBNISSE BRUSH B1 – MIT HOCHSPANNUNG

Bei der Berechnung mit Hochspannung werden der Zerstäuber sowie das zu lackierende Blech geerdet. Die Nadelspitzen der Elektroden werden mit einer Hochspannung von 67 kV belegt. Im Versuch wird genauso verfahren. Zusätzlich zu den Randbedingungen, welche die Strömung am Interface beschreiben, wird das Interface um eine Randbedingung ergänzt, die das elektrische Potential beschreibt. Dieses wird analog zur Strömungsfeldberechnung in einer Vorabsimulation gewonnen, die allein dazu dient, das sich am Interface einstellende elektrische Potential zu ermitteln.

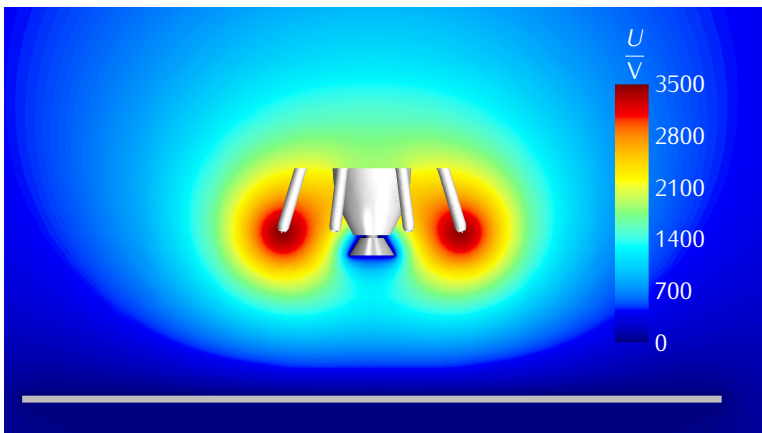


ABBILDUNG 6.11: Darstellung des elektrischen Potentials der Vorabsimulation in der Schnittansicht

Abbildung 6.11 zeigt einen Schnitt durch das elektrische Potential am ebenen Blech ohne den Einfluss von geladenen Lackpartikeln. Das Blech und der Glockenteller sind geerdet, an den Nadelspitzen liegt die Hochspannung an. Am Interface stellt sich das elektrische Potential ein, das für die nachfolgenden Simulationen des Technikumsversuchs als Eingangsgröße dient (vgl. Abbildung 6.12).

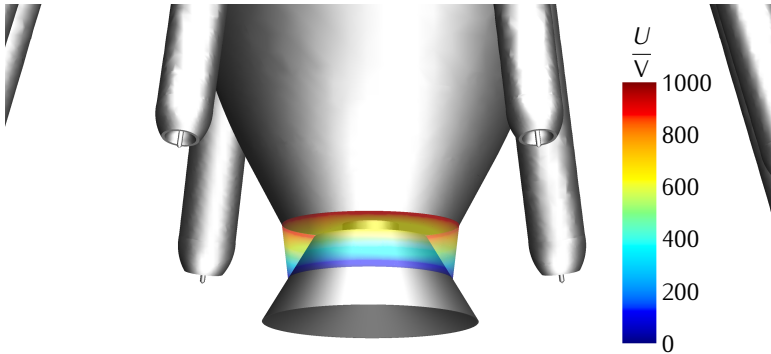


ABBILDUNG 6.12: Elektrisches Potential am Interface

Die Schichtdicken aus Simulation und Versuch sind in Abbildung 6.13 dargestellt. Der berechnete Schichtauftrag zeigt eine tendenziell breitere Schichtdickenverteilung als die Messung. Die absoluten Schichthöhen liegen in der Messung allerdings 1 bis 2 μm höher als in der Simulation. Damit ist der gemessene Auftrag konzentrierter als die Berechnung ihn wiedergibt.

Generell weist die gemessene Schichtdicke erhebliche Unregelmäßigkeiten auf. Diese sind in der Simulation weniger stark ausgeprägt. Wie bei den Simulationen ohne Hochspannung besitzt die berechnete Schichtdicke eine stärkere Gleichmäßigkeit als die gemessene. Dies liegt vermutlich an Störungen des realen Prozesses, die über die Simulation nicht wiedergegeben werden. Denkbar sind beispielsweise Druckschwankungen in der Luftzuführung oder bei der Lackierung mit Hochspannung auch das Auftreten von Spannungs-

schwankungen. In der Simulation hingegen wird die Spannung als konstante Randbedingung gesetzt, sodass keine Schwankungen auftreten können.

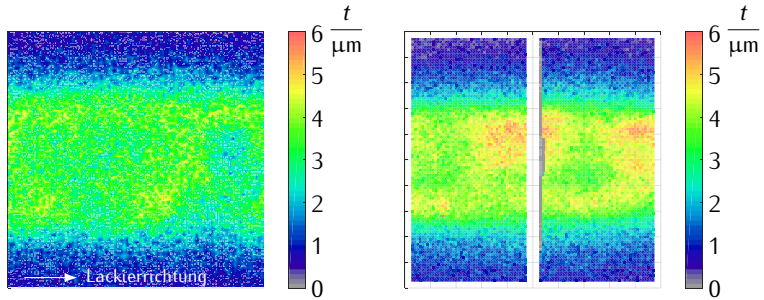


ABBILDUNG 6.13: Brush B1 mit Hochspannung – Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts)

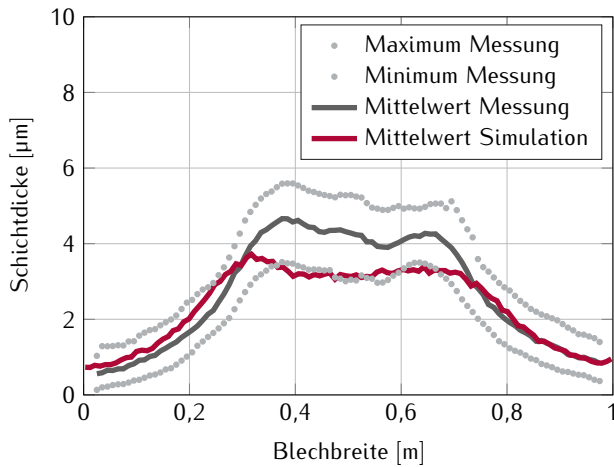


ABBILDUNG 6.14: Brush B1 mit Hochspannung – Profilschnitte von Simulation und Messung im Vergleich

Die Profilschnitte der Schichtdicken von Simulation und Messung besitzen im Zentrum ein Delta von ungefähr $2\text{ }\mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 6.14). Die Flanken der Mittelwertkurve aus dem Versuch werden in der Berechnung jedoch gut getroffen. Die Mittelwertkurve der berechneten Schichtdicke liegt an der Grenze des Zielkorridors der Messung.

Die Simulation weist einen Auftragswirkungsgrad von 82% auf gegenüber 87% in der Messung (vgl. Tabelle 6.5). Durch den Einsatz der Hochspannung ergibt sich ein deutlicher Anstieg im Auftragswirkungsgrad. Dies lässt sich sowohl in der Messung als auch in der Simulation nachvollziehen. Obwohl der berechnete Schichtauftrag den gemessenen unterschätzt, werden die Ergebnisse, gerade auch im Hinblick auf den Auftragswirkungsgrad, als akzeptabel bewertet. Sie zeigen jedoch nicht dieselbe sehr gute Übereinstimmung wie die Simulationsergebnisse ohne Hochspannung.

	Simulation	Messung
AWG B1 mit Hochspannung	82 %	87 %

TABELLE 6.5: Brush B1 mit Hochspannung – Auftragswirkungsgrade der Simulation und der Messung

6.3.7 AUSWERTUNG ERGEBNISSE BRUSH B2 – MIT HOCHSPANNUNG

Abbildung 6.15 zeigt die Gegenüberstellung von simulierten und gemessenen Schichtdickenverläufen für Brush B2 mit Hochspannung. Die berechnete Schichtdicke weicht deutlich von der Messung ab. Sie ist breiter, erreicht jedoch nicht die Höhe im Zentrum des Auftrags. Es ist die gleiche Tendenz wie bei Brush B1 erkennbar. Der reale Auftrag ist konzentrierter als der der Simulation. Allerdings besitzt der Auftrag mit Brush B2 noch stärkere Unregelmäßigkeiten, als es bei Brush B1 der Fall ist. Am linken Rand des beschichteten Bleches weist die Schichtdicke einen Betrag von ca. $5\text{ }\mu\text{m}$ auf, während es am rechten Rand über $7\text{ }\mu\text{m}$ sind. Der Brush B2 besitzt mit $300\frac{\text{ml}}{\text{min}}$ eine sehr hohe Farbmengeneinstellung bei einer eher geringen Lenkluftmenge von $220\frac{\text{NL}}{\text{min}}$. Da auch der Schichtauftrag ohne Hochspannung signifikante Unregelmäßigkeiten aufweist, scheint die Lenkluftmenge nicht auszureichen, um den Sprühkegel bei der hohen Farbmenge stabil zu halten. Die Simulation

lässt ebenfalls Schwankungen in der Schichtdicke erkennen, diese sind jedoch weniger stark ausgeprägt.

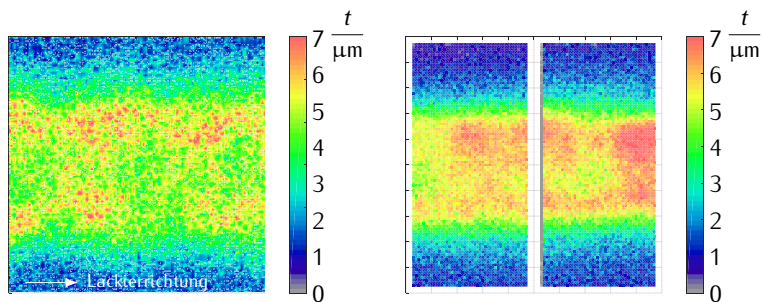


ABBILDUNG 6.15: Brush B2 mit Hochspannung – Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts)

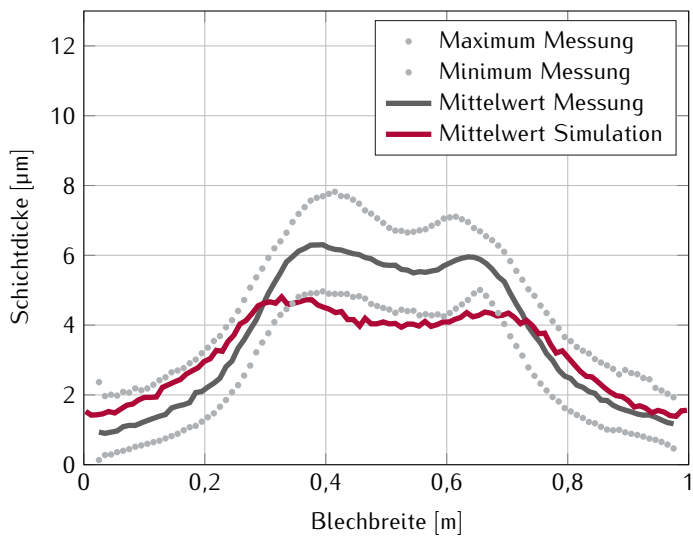


ABBILDUNG 6.16: Brush B2 mit Hochspannung – Profilschnitte von Simulation und Messung im Vergleich

Der Zielkorridor der Profilschnitte besitzt eine maximale Höhe von ca. 3 µm und liegt damit noch unterhalb der Zielkorridorhöhe von Brush B2 ohne Hochspannung (vgl. Abbildung 6.16). Das bedeutet, dass der Einsatz von Hochspannung dazu beiträgt, die Schwankungen im Schichtauftrag zu verringern. Zum ersten Mal liegt das Zentrum der berechneten Mittelwertkurve nicht innerhalb des Zielkorridors. Die Flanken weichen nur leicht von der Mittelwertkurve der Messung ab. Die Auftragswirkungsgrade der Simulation (83 %) und der Messung (88 %) sind mit den Ergebnissen zuvor bei Brush B1 vergleichbar (vgl. Tabelle 6.6).

Obwohl die Mittelwertkurve erstmalig nicht vollständig im Zielkorridor der Messung liegt, wird das Simulationsergebnis von Brush B2 noch als akzeptabel bewertet. Dies begründet sich vor allem in der geringen Abweichung der Auftragswirkungsgrade. Sie bedeutet, dass in der Simulation eine ähnliche Lackmenge auf das Blech aufgebracht wird wie in der Messung. Lediglich der qualitative Verlauf der Schichtdicke besitzt eine größere Abweichung. Die Wiedergabe im äußeren Bereich des Lackauftrags ist gut, auch wenn er breiter ist als die Messung. Im Zentrum jedoch fehlen ca. 2 µm an Schichtdicke im Vergleich zur Messung. Wie auch bei Brush B1 unterschätzt die Berechnung die Messergebnisse. Generell ist jedoch ein Unterschätzen der Messergebnisse positiver zu bewerten als ein Überschätzen. Durch das Unterschätzen werden Unterbeschichtungen strenger bewertet und es besteht keine Gefahr, dass diese nicht erkannt werden. Zudem sind Lackdefekte wie Läufer und Kocher, die durch Überbeschichtung entstehen, in der Praxis leichter zu identifizieren als eine etwaige Unterbeschichtung.

	Simulation	Messung
AWG B2 mit Hochspannung	83 %	88 %

TABELLE 6.6: Brush B2 mit Hochspannung – Auftragswirkungsgrade der Simulation und der Messung

6.3.8 AUSWERTUNG ERGEBNISSE BRUSH B3 – MIT HOCHSPANNUNG

Abbildung 6.17 zeigt die Gegenüberstellung der Schichtdicke von Simulation und Messung für Brush B3 mit Hochspannung. Obwohl die Ergebnisse für Brush B3 ohne Hochspannung die geringste Übereinstimmung mit der Messung

zeigen, ist das Ergebnis mit aktivierter Hochspannung sehr gut. Die Simulation gibt die Schichtdickenverteilung der Messung sowohl in Breite als auch Schichthöhe sehr gut wieder. Auch die Linkslastigkeit des Brushes ist in der Simulation wiederzufinden.

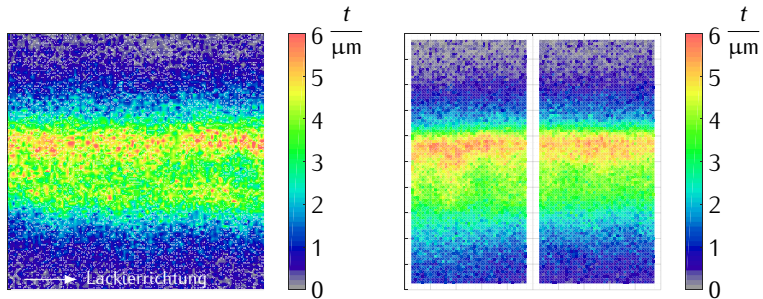


ABBILDUNG 6.17: Brush B3 mit Hochspannung – Vergleich von Simulation (links) und Messung (rechts)

Die Profilschnitte der Schichtdicken bestätigen das Ergebnis (vgl. Abbildung 6.18). Die Kurven besitzen eine sehr gute Übereinstimmung. Die Auftragswirkungsgrade von Simulation und Messung sind identisch (vgl. Tabelle 6.7).

Das außerordentlich gute Ergebnis der Simulation von Brush B3 mit aktivierter Hochspannung ist unerwartet. In der Auswertung der Simulationen ohne Hochspannung besitzt Brush B3 die geringste Übereinstimmung mit der Messung. Da die Tropfengrößenverteilung, die als Eingangsgröße in die Simulation eingeht, mit der größten Abweichung von den realen Prozesseinstellungen aufgenommen wurde, ist die Abweichung von der Messung durchaus nachvollziehbar. Obwohl die Berechnung von Brush B3 mit Hochspannung ein gutes Resultat erzielt, erschwert sie die Bewertung des Simulationsmodells. Da die Simulationsergebnisse ohne Hochspannung eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen zeigen, müssen die auftretenden Diskrepanzen in der Modellierung der Elektrostatik begründet liegen. Wie zuvor erwähnt (vgl. Abschnitt 3.4), wird die Ionendichte aus Effizienzgründen als konstante Größe modelliert. Dies ist eine Vereinfachung, die nicht die Realität widerspiegelt, da auch die Ionen sich im Raum verteilen und es Gebiete mit hoher und geringer

Ionendichte gibt. Im folgenden Abschnitt werden die Simulationsergebnisse mit Hochspannung zusammengefasst und ihre Qualität bewertet.

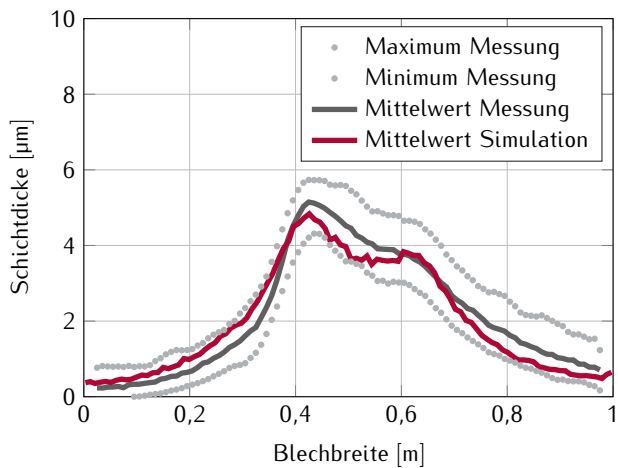


ABBILDUNG 6.18: Brush B3 mit Hochspannung – Profilschnitte von Simulation und Messung im Vergleich

	Simulation	Messung
AWG B3 mit Hochspannung	82 %	82 %

TABELLE 6.7: Brush B3 mit Hochspannung – Auftragswirkungsgrade der Simulation und der Messung

6.3.9 ZUSAMMENFASSUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE AM EBENEN BLECH MIT HOCHSPANNUNG

Für die Auswertung der Simulationsergebnisse mit aktivierter Hochspannung werden dieselben Brushkonfigurationen verwendet wie zuvor. Die Trennung der Berechnungen, zunächst ohne Hochspannung und anschließend mit, wird vorgenommen, um die Anpassungen, die für die Berücksichtigung der Elektrostatik im Modell ergänzt werden, separat bewerten zu können. Während die Ergebnisse der Simulation ohne Hochspannung eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen aufweisen, liefert das Modell mit Hochspannung in Bezug auf die

Charakteristik des Schichtauftrags nur akzeptable Ergebnisse. Brush B1 und B2 zeigen dabei denselben Trend. Der Auftrag wird generell breiter und verliert an Schichtdicke im Zentrum. Die Abweichung der Auftragswirkungsgrade liegt jedoch weiterhin in einem guten Bereich. Das bedeutet, dass zwar ungefähr die gleiche Menge an Lacktropfen auf dem Blech deponiert, allerdings nicht in der korrekten Region. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse dennoch als akzeptabel und verwendbar bewertet. Zudem besteht beim Unterschätzen der Messergebnisse nicht die Gefahr, dass Unterbeschichtungen unerkannt bleiben. Diese sind in der Praxis schwieriger zu identifizieren als Defekte, die durch Überbeschichtung entstehen, wie Läufer oder Kocher.

Eine Ausnahme bildet die Simulation von Brush B3. Die Resultate sind hier außerordentlich gut, obwohl die Eingangsgröße der Tropfenverteilung fehlerbehaftet ist (vgl. Abschnitt 5.1). Dieses Ergebnis erschwert die Bewertung des Modells, da nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, welche Effekte hierfür ursächlich sind. Da die Modellierung des Lackierprozesses ohne Hochspannung grundsätzlich sehr gute Resultate liefert, müssen die Schwächen der Ergebnisse mit Hochspannung in der Modellierung der Elektrostatik begründet liegen. Wie Abschnitt 3.4 beschrieben, wird bei der Modellierung die Raumladungsdichte vereinfachend als konstant angenommen.

Im Wissen, dass diese Einschränkung vermutlich ursächlich für den Verlust an Genauigkeit ist, wird das Modell dennoch so beibehalten. Dies liegt vor allem im Einsparen von zusätzlichem Rechenbedarf begründet. Zwar wäre es denkbar, die Komplexität des Ebenen-Blech-Modells weiter zu steigern, in Hinblick auf das Fahrzeugmodell aber, welches einen enormen Anstieg der Zellanzahl mit sich bringt, wird davon Abstand genommen.

Die übrigen der zwölf Brushkonfigurationen für den Prozessschritt der BC1 Außenlackierung zeigen einen ähnlichen Trend wie Brush B1 und Brush B2. Aus diesem Grund, und weil die Resultate von Brush B3 zwar nicht nachvollzogen werden können, grundsätzlich aber gut sind, wird das Modell auf die Simulation der Fahrzeugkabine übertragen, wohl wissend um die zuvor genannten Schwächen, die das Modell noch hat.

7

NUMERISCHE SIMULATION DER DECKLACKIERKABINE

Die numerische Simulation der Decklackierkabine stellt den letzten Schritt der vorgestellten Simulationsmethode dar. Wie zuvor beschrieben, nimmt der Aufwand der Methode mit jedem Schritt zu. Bei der Abbildung der Lackierkabine beruht dies vor allem auf der komplexen Fahrzeuggeometrie, der Erweiterung des abgebildeten Raumes um die Abmessungen einer Lackierkabine sowie der Betrachtung von nun vier simultan arbeitenden Zerstäubern, die sich auf realen Bahnpfaden bewegen.

Die Außenlackierung wird in zwei Zonen durchgeführt. Zuerst werden die Motorhaube, das Dach, die Seitenwände und die Heckklappe lackiert. Hierbei arbeiten bis zu vier Roboter gleichzeitig. Anschließend lackieren zwei Roboter die Türen und einen Teil der hinteren Seitenwand in der zweiten Zone. Die Bahnpfade der Roboter für die beiden Zonen sind in Abbildung 7.1 dargestellt, die zeitliche Abfolge und die Zuordnung der Roboter in Abbildung 7.2. Um zu verdeutlichen, welcher Roboter welches Bauteil lackiert, werden den Bahnen unterschiedliche Farben zugewiesen. Die Prozesszeit einer Zone beträgt ungefähr 55 s.

Für jede Zone wird jeweils ein Simulationsmodell aufgebaut, sodass beide Zonen bei Bedarf gleichzeitig berechnet werden können. Die Schichtdickenergebnisse können anschließend nach dem Superpositionsprinzip aufaddiert werden. Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse soll anhand von zwei Untersuchungsbeispielen gezeigt werden, welche Analysemöglichkeiten die Simulation der Fahrzeuglackierung eröffnet.

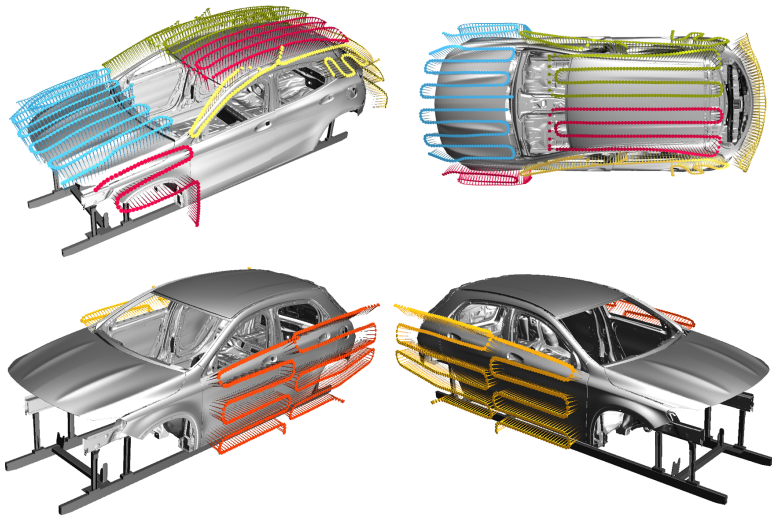


ABBILDUNG 7.1: Roboterbahnen für die Außenlackierung – Zone 1 oben, Zone 2 unten. Die unterschiedlichen Farben symbolisieren die zum Einsatz kommenden Roboter.

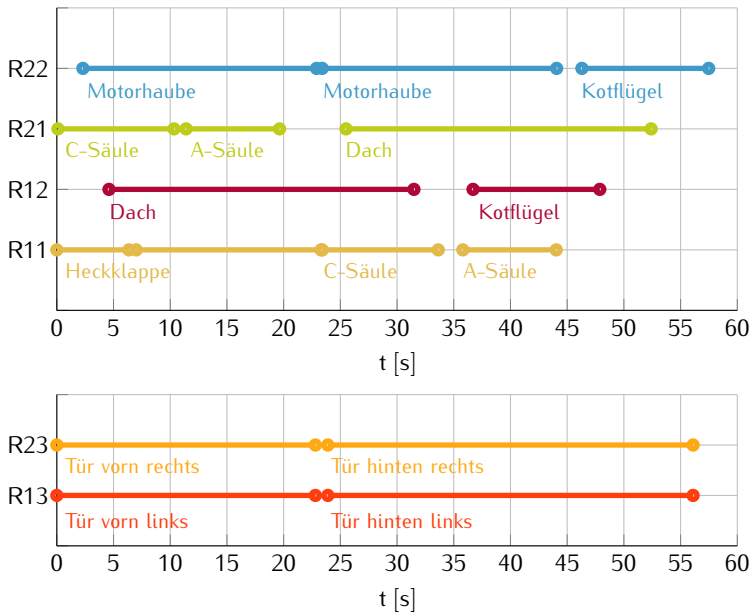


ABBILDUNG 7.2: Zeitliche Abfolge des Lackierprogramms – Zone 1 oben, Zone 2 unten

7.1 GEOMETRISCHES MODELL, VERNETZUNG UND SIMULATIONSABLAUF

Das geometrische Modell besteht zunächst aus den Oberflächengeometriedaten des Fahrzeugs und einer umgebenden quaderförmigen Lackierkabine. Die Lackierkabine ist 11 m lang, 5,5 m breit und 4,6 m hoch. Diese Bereiche werden mit einem Hintergrundnetz vernetzt. Die maximale Zellgröße an der Oberfläche des Fahrzeugs wird mit 10 mm festgesetzt und entspricht damit der Auflösung des ebenen Blechs. Die Zerstäuberbewegung wird wie zuvor beim Ebenen-Blech-Modell mit Hilfe von überlappenden Chimera-Netzen umgesetzt (vgl. Abschnitt 6.1). Die Roboter selbst werden nicht modelliert, da ihr Einfluss auf den Prozess als sekundär betrachtet wird. In der realen Lackierkabine sind bis zu vier Roboter positioniert, welche die Lackierung durchführen. Jeder Roboter lackiert mehrere Fahrzeugabschnitte. Roboter R11 beispielsweise lackiert

die Heckklappe, die linke A-Säule und die linke C-Säule (vgl. Abbildung 7.2). In der Simulation werden für jeden Fahrzeugabschnitt an der jeweiligen Startposition der Bahn ein Zerstäuber und eine zylindrische Overset-Region definiert, sodass weitaus mehr überlappende Vordergrundnetze und Zerstäuber aufgebaut werden, als in der Realität Roboter agieren. Dadurch kann die Transferbewegung vom Endpunkt einer Bahn zum Startpunkt der nächsten eingespart werden und muss nicht simuliert werden. Die Zerstäuber werden entsprechend der Zeitpunkte in Abbildung 7.2 aktiviert bzw. deaktiviert.

Die Bereiche, in denen die Zerstäuber verfahren, werden verfeinert, um einen guten Übergang zwischen überlappendem Vordergrundnetz und Hintergrundnetz zu gewährleisten. Die Verfeinerungen des Hintergrundnetzes sind wie ein Schlauch um die Bewegungspfade der Zerstäuber angeordnet. In Abbildung 7.3 ist beispielhaft das verfeinerte Gebiet für die Lackierpfade im Bereich der Fahrertür dargestellt. Alle Roboterpfade werden auf diese Weise verfeinert. Auf Grund der Dimensionen des Kabinenmodells ist es umso entscheidender, die Vernetzung sorgfältig zu definieren. Um Zellen einzusparen, besitzen die verfeinerten Bereiche minimal größere Abmessungen als die zylindrischen Overset-Regionen der Zerstäuber, sodass diese gerade umhüllt werden, wenn sie sich auf den Pfaden bewegen.

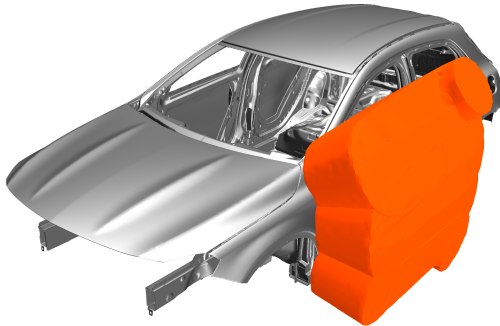


ABBILDUNG 7.3: Verfeinerte Netzbereiche für die Zerstäuberbewegung an der Fahrertür

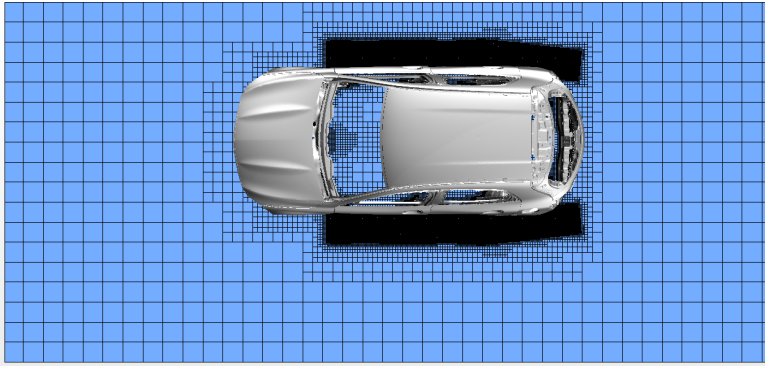


ABBILDUNG 7.4: Zellwachstum im Hintergrundnetz

Gleichzeitig wächst die Zellgröße des Hintergrundnetzes in Richtung der Außenwände schnell an. Auch dies dient der Zelleinsparung und daraus resultierend der Einsparung von Rechenzeit. Abbildung 7.4 zeigt einen Schnitt durch das Hintergrundnetz auf Höhe der Türen. Es wird angenommen, dass die Bereiche fernab der Fahrzeugoberfläche keinen Einfluss auf den Lackierprozess haben und dementsprechend gröber diskretisiert werden können.

Aber nicht nur die geometrischen Dimensionen nehmen zu. Wie zuvor beschrieben, kommen in der Lackierkabine vier Zerstäuber gleichzeitig zum Einsatz. Da die Zerstäuber auf die gleiche Weise arbeiten wie im Ebenen-Blech-Modell, bedeutet dies, dass vier Mal so viele Parcels in das Rechengebiet eingebracht werden. Um die Anzahl der aktiven Parcels zu begrenzen, werden sie ebenfalls aus der Berechnung gelöscht, sobald sie auf die Wände der Lackierkabine treffen. Da die Wände der Lackierkabine jedoch nur von wenigen Parcels erreicht werden, werden noch weitere Kriterien definiert. Das erste Kriterium ist, dass Tropfen gelöscht werden, sobald sie sich unterhalb des Fahrzeugs befinden. Es wird angenommen, dass diese Tropfen die Fahrzeugoberfläche nicht mehr erreichen und deshalb keine weitere Berechnung ihrer Bewegung erforderlich ist. Das zweite Kriterium betrifft kleine leichte Tropfen mit einem Durchmesser unterhalb von $50\text{ }\mu\text{m}$, die sich länger als 4 s im Rechengebiet bewegen, ohne auf der Fahrzeugoberfläche aufzutreffen. Auch diese werden aus der Rechnung genommen.

Analog zum Ebenen-Blech-Modell werden an der Decke der Lackierkabine eine Dirichlet-Randbedingung für die Kabinensinkluff und der Boden als Druckauslass definiert. Die Schichtdicke an der Fahrzeugoberfläche, die aus den deponierenden Lacktropfen gebildet wird, wird auf die gleiche Weise wie beim Ebenen-Blech-Modell berechnet.

Auf Grund der Komplexität des Prozessablaufs wird für die Steuerung der Simulation ein Java-Script verwendet. Dieses Programm übernimmt abhängig von den entsprechenden Schaltzeitpunkten die Deaktivierung bzw. Aktivierung der überlappenden Vordergrundnetze, sowie das Einlesen der Partikelgrößenverteilungen, der Brusheinstellungen, das Setzen der Randbedingungen und die Zuordnung der Bahnpfade. Die Partikelgrößenverteilungen sowie die zuvor im Strömungsmodell berechneten Interfacedaten werden während der Simulation aus Tabellen abgerufen, sodass mit diesen Informationen die entsprechenden Randbedingungen definiert werden können.

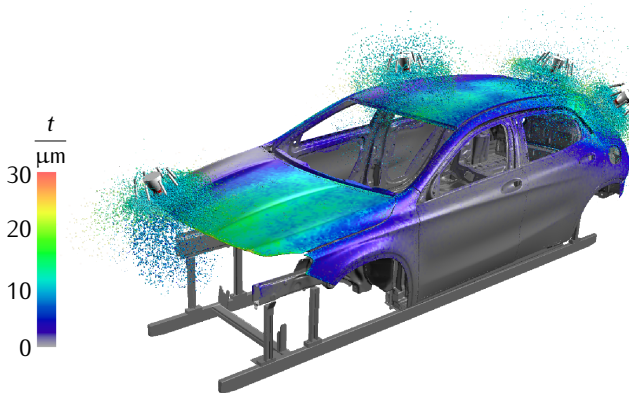


ABBILDUNG 7.5: Momentaufnahme Lackiersimulation in Zone 1

Bevor die tatsächliche Simulation gestartet wird, werden die Bewegungsabläufe in einem ersten Testlauf überprüft. Dafür sind die Gleichungslöser für Euler- und Lagrange-Phase deaktiviert. Im Testlauf wird geprüft, ob die Zerstäuber den Bahnpfaden korrekt folgen und zur richtigen Zeit starten und stoppen. Außerdem wird sichergestellt, dass die Vernetzung ordnungsgemäß

durchgeführt wurde. Das heißt, es darf bei der Bewegung innerhalb der Verfeinerungen nicht zu Fehlern kommen, weil Vorder- und Hintergrundnetz nicht korrekt miteinander verschnitten werden. Diese Überprüfungen sind sehr wichtig, da Fehler, die erst während der Laufzeit festgestellt werden, auf Grund des enormen Rechenbedarfs der Simulation große Zeitverluste zur Folge hätten. So kann sichergestellt werden, dass die Abläufe korrekt wiedergegeben werden. Die Simulation selbst benötigt eine Rechenzeit von mehreren Wochen auf einem High-Performance-Computing Cluster. Abbildung 7.5 zeigt eine Momentaufnahme aus der Lackierung in Zone 1.

7.2 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse des Kabinenmodells sind viele unterschiedliche Analyseansätze denkbar. Wie zuvor erklärt, ist das wichtigste Kriterium die resultierende Lackschichtdicke auf der Fahrzeugoberfläche. Sie kann mit Hilfe der Simulation auf Über- und Unterbeschichtung untersucht werden. Aber auch tiefergehende Prozessanalysen zu Themen aus dem Bereich der Fahrzeuglackierung sind denkbar, beispielsweise Oversprayoptimierung bzw. Auftragswirkungsgrodoptimierung, die Ursachenanalyse für Zerstäuberverschmutzung (Eigen- und Fremdverschmutzung), Robotertaktung, Bahnoptimierung, Brushoptimierung.

Exemplarisch soll in dieser Arbeit die Lackschichtuntersuchung an zwei Fahrzeugabschnitten vorgestellt werden. Da lediglich einzelne Messpunkte für eine Validierung der Schichtdicke zur Verfügung stehen, werden Dokumentationen über Sollschichtdicken für die Bewertung hinzugezogen. Für die BC1 Außenlackierung sei eine Sollschichtdicke im getrockneten Zustand von $14\text{ }\mu\text{m}$ mit einer Toleranz von $-2\text{ }\mu\text{m}$ und $+3\text{ }\mu\text{m}$ gefordert. Zunächst soll also betrachtet werden, ob die Mindest- und Maximalschichtdicken erreicht werden und welche kritischen Bereiche sich identifizieren lassen.

Abbildung 7.6 zeigt eine Einfärbung aller Bereiche am Fahrzeug, die in der Simulation eine Schichtdicke von mindestens $12\text{ }\mu\text{m}$ besitzen. Auf den meisten Flächen wird die Mindestschichtdicke von $12\text{ }\mu\text{m}$ erreicht. Die Motorhaube zeigt Bereiche, in denen die Mindestschichtdicke nicht erreicht wird. Eine Ursache hierfür könnte jedoch die Tatsache sein, dass der simulierte Auftrag

den realen Auftrag tendenziell unterschätzt, wie sich bei der Auswertung vom Ebenen-Blech-Modell gezeigt hat (vgl. Abschnitt 6.3). Sollte dies nicht der Fall sein, könnte die Unterbeschichtung auf der Motorhaube möglicherweise durch das Implementieren einer weiteren Bahn vermieden werden, sodass die Bahnpfade enger zusammenrücken und sich die Überlappung der Schichtaufträge vergrößert. Eine andere Möglichkeit wäre es, die Bruscheinstellungen für die Lackierung der Motorhaube anzupassen, sodass mehr Lack auf die Oberfläche gelangt. Ein kritischerer Bereich ist die Kennzeichenmulde auf der Heckklappe. Hier scheint sich ein Spritzschatten zu ergeben, der im Verlauf detailliert untersucht werden soll.

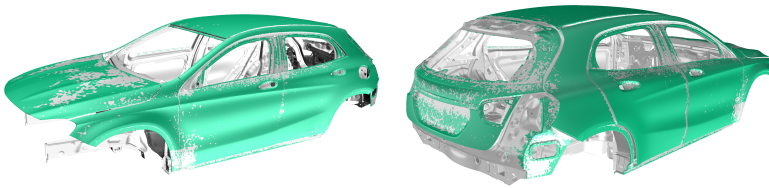


ABBILDUNG 7.6: Einfärbung der Bereiche oberhalb von $12\mu\text{m}$

Für das Lackierergebnis ebenfalls entscheidend ist die Frage nach Überbeschichtung. Sie kann zu Lackdefekten wie Läuferten oder Kochern führen und steigert die Lackkosten unnötigerweise. In einer analogen Darstellung werden in Abbildung 7.7 Gebiete gezeigt, in denen die Lackschichtdicke oberhalb von $17\mu\text{m}$ liegt. Bei der Lackierung mit Hochspannung ist vor allem an Kanten die Gefahr von Überbeschichtung groß, wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben wird. Dieser Effekt kann anhand der Simulationsergebnisse gut nachvollzogen werden. Besonders an der Kante der Motorhaube liegen Bereiche mit Schichtdicken über $17\mu\text{m}$. Auch an der Unterkante der Kennzeichenmulde weist die Lackschichtdicke eine Überhöhung auf. Der Zustand, dass im Umfeld der Kennzeichenmulde sowohl die Gefahr von Unterbeschichtung als auch von Überbeschichtung besteht, identifiziert diesen Bereich als besonders kritisch. Aus diesem Grund soll die Lackierung der Heckklappe genauer untersucht werden.

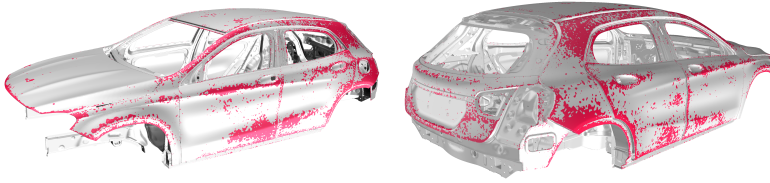
ABBILDUNG 7.7: Einfärbung der Bereiche oberhalb von 17 μm

Abbildung 7.8 zeigt die Schichtdickenverteilung auf der Heckklappe. Im unteren Bereich der Kennzeichenmulde sowie an der Kante werden die 14 μm erreicht. Im oberen Bereich allerdings befindet sich nur eine Schichtdicke von rund 2 μm bis maximal 8 μm . Damit wird die geforderte Schichtdicke deutlich unterschritten.

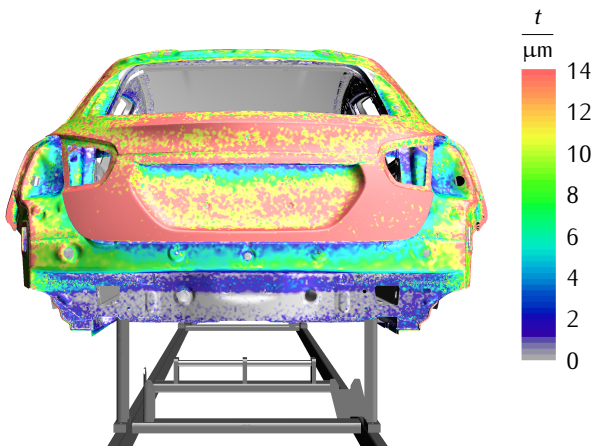


ABBILDUNG 7.8: Schichtdickenverteilung auf der Heckklappe

Bei der Betrachtung des elektrischen Feldes im Verlauf der Heckklappenbeschichtung wird die zuvor angesprochene Problematik der ESTA-Lackierung deutlich (vgl. Abbildung 7.9). An den Kanten, welche die Kennzeichenmulde umgeben, ist die elektrische Feldstärke besonders hoch. Die geladenen Lackpartikel werden zu diesen Kanten gelenkt und deponieren dort. Der obere Teil der Kennzeichenmulde wird vom elektrischen Feld abgeschirmt, sodass

die Beschichtung in dieser Region behindert wird. Dieser Effekt könnte eine Ursache für die unzureichende Lackschichtdicke an der Kennzeichenmulde sein.

Als nächstes soll auch das Strömungsfeld an dieser Stelle betrachtet werden, um zu untersuchen, welchen Einfluss die Lenkluft auf die Beschichtung hat. Abbildung 7.10 zeigt eine vektorielle Darstellung der Zerstäuberströmung während der Lackierung der Heckklappe. Es ist zu erkennen, wie sich in dem Bereich, in dem die Strömung auf die Kennzeichenmulde prallt, ein Wirbel bildet. Die Ausläufer dieses Wirbels strömen im Unterdruckgebiet des Zerstäubers wieder in Richtung desselben. Die Aufwärtsströmung findet genau in dem Bereich der Kennzeichenmulde statt, der eine Unterbeschichtung aufweist. Die Lacktropfen, die der Lenkluftströmung in dem Bereich folgen, deponieren nicht auf der Oberfläche, sondern werden von ihr nach oben in Richtung Zerstäuberglocke gerissen.

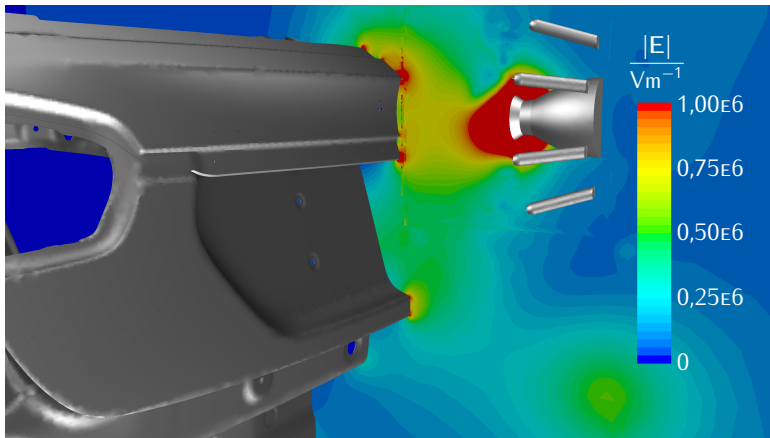


ABBILDUNG 7.9: Elektrische Feldstärke im Bereich der Heckklappe

Mit Hilfe der Simulation kann nachvollzogen werden, dass sowohl das elektrische Feld als auch die Verwirbelungen der Lenkluftströmung die Beschichtung der Kennzeichenmulde negativ beeinflussen. Systembedingt kann die Hochspannung während des Lackierprozesses nicht kurzfristig aktiviert oder deaktiviert werden. Deshalb ist es nicht möglich, den Fahrzeugabschnitt

der Kennzeichenmulde ohne Hochspannung zu beschichten. Eine bessere Möglichkeit wäre es, die Lenkluftmenge zu reduzieren, damit die Luftströmung mit weniger Energie auf die Oberfläche der Heckklappe prallt. Dadurch würde sich die Aufwärtsströmung reduzieren, sodass die Lacktropfen die Kennzeichenmulde erreichen können.

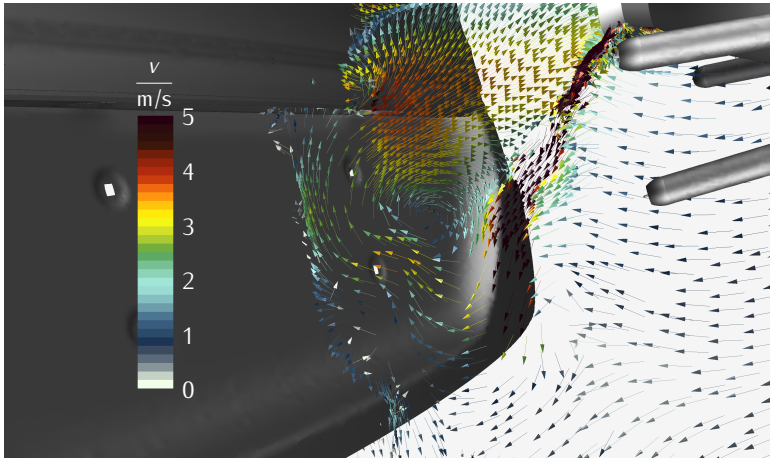


ABBILDUNG 7.10: Vektorielle Darstellung der Zerstäuberströmung auf Höhe der Heckklappe

Als weiteres Beispiel für die Analysemöglichkeiten, die sich durch die numerische Simulation der Lackierkabine ergeben, soll die Lackierung des Dachs betrachtet werden. Während Roboter R12 die linke Dachfläche lackiert, wird gleichzeitig die Seitenwand auf der Beifahrerseite von Roboter R21 zwischen A-Säule und C-Säule lackiert (vgl. Abbildung 7.2). Dabei begegnen sie sich im Verlauf der Lackierung ungefähr auf Höhe der Fondtüren. Dieser Moment soll mit Hilfe der Simulation untersucht werden. Zur Vereinfachung werden die Zerstäuber im Folgenden mit Z_D und Z_S bezeichnet. Das heißt, Zerstäuber Z_D lackiert die Dachfläche, Zerstäuber Z_S lackiert die Seitenwand zwischen A- und C-Säule.

Um die Dynamik zu erfassen, die sich bei der Begegnung abspielt, werden die Zerstäuber zu mehreren Zeitpunkten betrachtet. Abbildung 7.11 zeigt

vier Momentaufnahmen, in denen sie sich aufeinander zubewegen. Durch den rechten Zerstäuber Z_S verläuft dabei eine Schnittebene, in der die vektorielle Ansicht des Strömungsfelds dargestellt wird. Auf Grund ihrer Nähe zueinander kommt es zu einer Beeinflussung der Lenkluftströmungen. Zum ersten Zeitpunkt (I) ist zu erkennen, wie sich im Gebiet zwischen den beiden Zerstäubern ein Wirbel ausbildet. Dieser Wirbel vergrößert sich (II) und bewegt sich auf den Zerstäuber Z_D zu (III). Schließlich löst sich der Wirbel auf und resultiert in einer breiten Strömung, deren Richtung parallel zur Oberfläche verläuft und über das Dach hinwegbläst (IV). Abbildung 7.12 zeigt den gleichen Zeitpunkt (IV) in einem Schnitt durch das skalare Strömungsfeld. Hier wird deutlich, dass eigentlich nur die Strömung des Zerstäubers Z_D beeinträchtigt wird. Die Untersuchung der verwendeten Brusheinstellungen ergibt, dass zwar beide Zerstäuber mit einer ähnlichen Farbmenge betrieben werden, sich die Lenkluftmengen aber massiv unterscheiden. Während Zerstäuber Z_D eine Lenkfluteinstellung von $180 \frac{NL}{min}$ besitzt, wird die Lackierung der Seitenwand durch Zerstäuber Z_S mit einer Lenkluftmenge von $380 \frac{NL}{min}$ durchgeführt. Damit besitzt der Brush von Zerstäuber Z_S eine viel energiereichere Lenkluftströmung, welche das Strömungsfeld von Zerstäuber Z_D stört. Die Verwirbelungen unterhalb von Zerstäuber Z_D können sowohl in einer Zerstäuberverschmutzung als auch in einem ungleichmäßigen Lackauftrag resultieren. Zwar zeigen die Abbildungen 7.6 und 7.7, dass die geforderten Sollsichtdicken auf der Dachfläche sehr gut erreicht werden, dennoch kann der gleichmäßige Lackauftrag beeinträchtigt werden. Tatsächlich wird in der Schichtdickenverteilung auf dem Dach in Abbildung 7.13 eine ungleichmäßige Beschichtung deutlich. Auf Höhe der rechten Fondtür ist die Lackschicht ausgeprägter als auf der linken Seite. Außerdem erscheint die Beschichtung auf der linken Seite auf Höhe der C-Säule unterbrochen. Die Lackschichtdicke ist dort geringer als in der direkten Umgebung. Dieser Effekt ist möglicherweise auf das gestörte Strömungsfeld von Zerstäuber Z_D während der Begegnung zurückzuführen. Die Simulation zeigt, dass die Beeinträchtigungen, die während der Zerstäuberbegegnung im Strömungsfeld sichtbar werden, keine signifikanten Auswirkungen haben, da das Beschichtungsziel erfüllt wird.

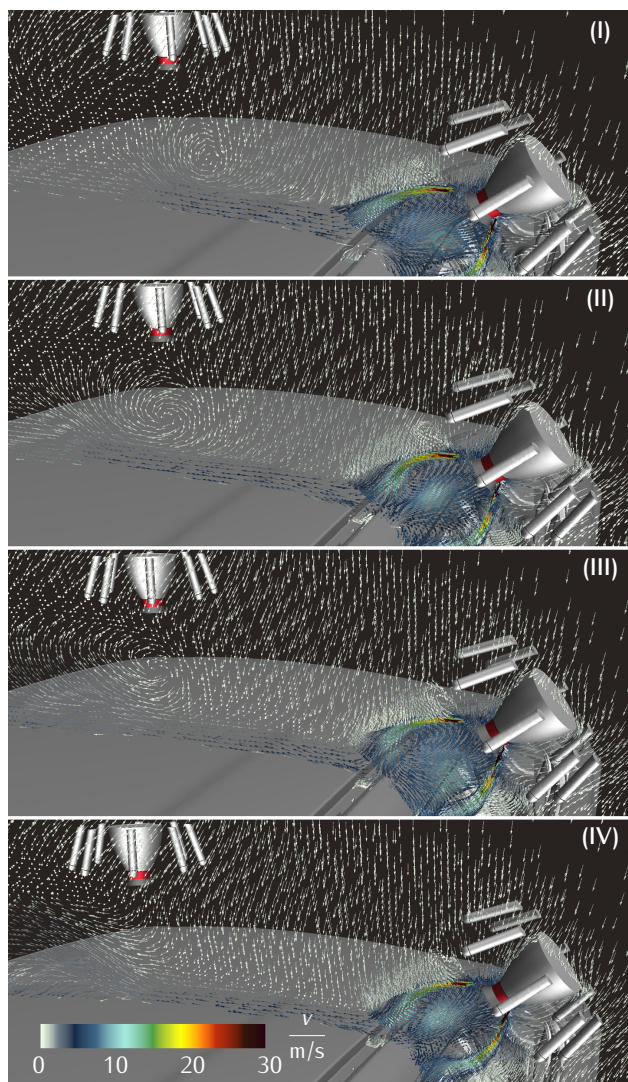


ABBILDUNG 7.11: Vektorielle Ansicht des Strömungsfeldes in den Momenten der Begegnung

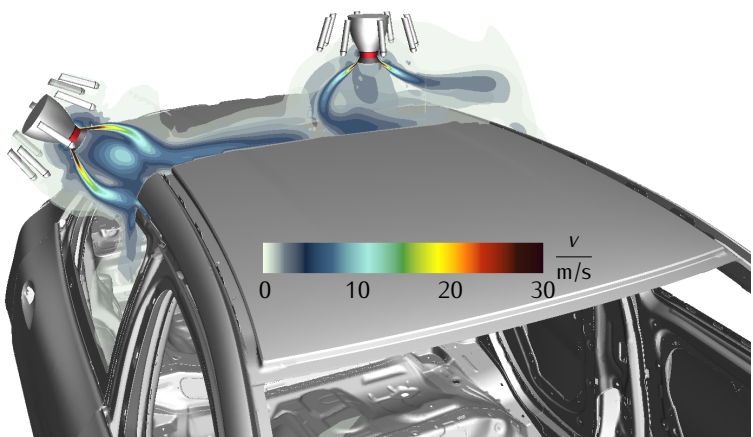


ABBILDUNG 7.12: Schnitt durch das Strömungsfeld zum Zeitpunkt (IV) der Begegnung

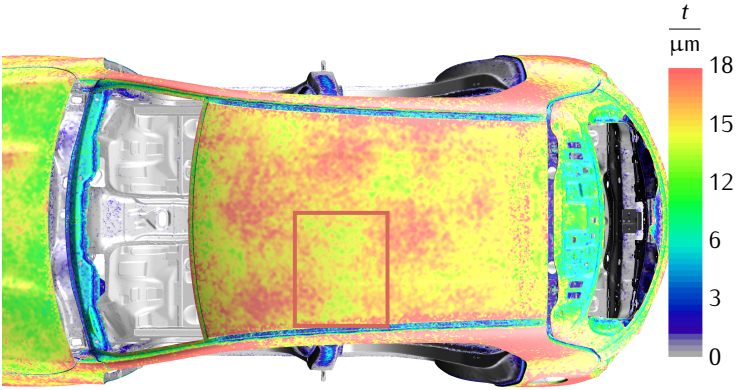


ABBILDUNG 7.13: Schichtdickenverteilung auf dem Dach

7.3 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Durch die digitale Prozessanalyse auf Basis der numerischen Simulation können schon vor dem ersten Realversuch Schwachstellen im Prozessablauf identifiziert und vermieden werden. Am Beispiel der Kennzeichenmulde werden die Schwierigkeiten herausgestellt, die bei der Beschichtung der komplexen Geometrie eines Fahrzeugrohbaus auftreten. Durch hervorstehende Kanten kommt es bei aktivierter Hochspannung zu hohen elektrischen Feldstärken an eben diesen. Die hohen Feldstärken bewirken, dass geladene Lacktropfen bevorzugt an den Kanten deponieren, sodass die Beschichtung umgebender Bereiche beeinträchtigt wird. Bei der Lackierung der Kennzeichenmulde kommt zudem hinzu, dass sich ein Wirbel im Strömungsfeld formiert, der die Tropfen aus der Mulde herausschleudert und so den Lackiervorgang erschwert. Die Auswirkungen dieser zwei Phänomene sind in der Überbeschichtung der Muldenberandung und einer Unterbeschichtung der Muldenfläche wiederzufinden. Sie werden anhand von Schnittebenen durch E-Feld und Strömungsfeld sowie anhand von Schichtdickenverläufen veranschaulicht.

Ein besonderer Fokus liegt bei der Decklackierung darauf, dass sich die vier Roboter, die gleichzeitig in der Lackierkabine agieren, nicht gegenseitig im Prozessgeschehen beeinträchtigen. Aus diesem Grund wird ein Moment im Lackierprozess betrachtet, bei dem sich zwei der vier Roboter sehr nahe sind und aneinander vorbeifahren. Dabei wird untersucht, wie sich die Begegnung der Zerstäuber auf die jeweiligen Lenkluftströmungen auswirken. Sobald sich die Zerstäuber auf Höhe der Fondtüren begegnen, bildet sich ein Wirbel aus. Dieser Wirbel stört massiv das Strömungsverhalten des Zerstäubers, der die schwächere Lenklufteinstellung besitzt. Der Sprühkegel verliert an Stabilität und wird auseinandergedrückt. Trotz dieses deutlichen Einflusses auf die Zerstäuberlenkluft kann nur eine geringe Auswirkung auf den Schichtdickenverlauf festgestellt werden. Die Simulation zeigt, dass die Sollschichtdicke erreicht wird. Diese beiden Beispiele stehen exemplarisch für zahlreiche Analyse- und Optimierungsmöglichkeiten, die durch die numerische Simulation des Decklackierprozesses zur Verfügung stehen.

8

KRITISCHE REFLEXION

Die größte Herausforderung bei der Simulation des automobilen Decklackierprozesses stellt die benötigte Rechenleistung dar. Problemstellungen der Strömungsmechanik gehören zu den anspruchsvollsten Themengebieten der Numerik. Diese Einordnung beruht vor allem auf den zu Grunde liegenden mathematischen Modellgleichungen, den Navier-Stokes-Gleichungen. Sie bilden ein System nichtlinearer partieller Differentialgleichungen zweiter Ordnung, die analytisch nur unter vereinfachenden Annahmen lösbar sind. Zur Lösung werden qualifizierte numerische Verfahren benötigt. Für die Simulation des Lackierprozesses muss die kontinuierliche Phase der Luftströmung zusätzlich mit der dispersen Phase der Lackpartikel über einen Euler-Lagrange-Ansatz gekoppelt werden. Die physikalische Modellierung des Problems bringt also bereits große Anforderungen an die Rechenleistung mit sich.

Erschwerend kommt die Dimension des Rechengebiets hinzu, auf das die Modellgleichungen angewendet werden. Das Modell der Lackierkabine samt Fahrzeugkarosserie besitzt ein Hintergrundvolumennetz mit rund 23 Millionen Zellen. Pro aktivem Zerstäuber kommt ein überlappendes Netz mit rund 2,3 Millionen Zellen hinzu. Für maximal vier aktive Zerstäuber bedeutet dies eine zusätzliche Zellanzahl von 9,2 Millionen Zellen. Das gesamte Modell beläuft sich also auf über 30 Millionen Zellen.

Bei der Entwicklung der Simulationsmethode war stets darauf zu achten, sie so ressourcenschonend wie möglich zu gestalten. Diese Anforderung erstreckt sich auf alle Modellierungsaspekte und wurde, wo immer möglich, berücksichtigt. So wurden lediglich die Zerstäuber, nicht aber die Roboter selbst modelliert. Die Simulation der Transferbewegungen eines Zerstäubers zwi-

schen dem Endpunkt eines Lackierabschnitts und dem Startpunkt des nächsten Abschnitts wurde umgangen, indem am Startpunkt eines jeden Lackierabschnitts Zerstäuber modelliert und nur nach Bedarf aktiviert werden. Auch bei der Netzgestaltung wurde beispielsweise durch die gezielte Verfeinerung der Zerstäuberpfade darauf geachtet, die Zellanzahl möglichst gering zu halten.

Die größte Zeitersparnis bringt jedoch die Aufteilung in Strömungsmodell, Ebenes-Blech-Modell und Kabinen-Modell. Durch den Einsatz des Interfaces im Ebenes-Blech-Modell und im Kabinen-Modell konnte das hochauflösende Berechnungsnetz eingespart werden, das für eine gute Wiedergabe der Prozessdynamik im Bereich der Lenklufteinströmung benötigt wird.

Zu großen Zeitverlusten führten Abstürze des Gleichungslösers. Ursächlich hierfür ist häufig ein Problem in der Netzqualität. Deshalb sollten im Vorfeld eine sorgfältige Netzgestaltung und Netzüberprüfung vorgenommen werden. Zwar ermöglicht das Zurückspringen auf einen älteren Speicherzustand die Möglichkeit zur Korrektur und Wiederaufnahme der Berechnung. Dennoch geht durch Fehlersuche und -behebung unnötigerweise Zeit verloren. Zur Überprüfung der Rechenetzqualität stehen in der Simulationssoftware Tools zur Verfügung, welche die Zellen des Netzes anhand unterschiedlicher Gütekriterien bewerten. Um das Netz während der Laufzeit und vor allem den Schnitt der bewegten Overset-Regionen mit dem Hintergrundnetz zu testen, wird im Vorfeld der eigentlichen Berechnung ein Testlauf absolviert, bei dem nur die Zerstäuberbewegung aktiviert ist. Jegliche andere Physik, wie Luftströmung und Partikelinjektion, sind deaktiviert. So kann sichergestellt werden, dass beim Verschneiden von Vorder- und Hintergrundnetz keine Probleme auftreten.

Bei der Modellierung der zeitabhängigen Partikelladung wurde zu Gunsten der Rechenzeit entschieden, die Ionendichte im Rechengebiet als konstant anzunehmen, sodass ein weiteres, für jede Zelle zu lösendes Gleichungssystem eingespart werden konnte. Die Abweichungen, die sich für diese Fälle zwischen Mess- und Simulationsergebnissen zeigen, werden auf die Vereinfachung zurückgeführt. Im Zeitrahmen der Arbeit war es nicht möglich, ein geeignetes Ersatzmodell oder eine effiziente Modellierung der Ionenverteilung im Rechengebiet zu entwickeln. Die Ergebnisse legen jedoch nahe, dass hier ein Verbesserungspotential für die Berechnungen mit Hochspannung besteht.

Um die Qualität der Ergebnisse weiter zu verbessern, sollte dies in der Weiterentwicklung der Methode berücksichtigt werden. Kann die Berechnung des Ionenfelds im Rahmen des Kabinen-Modells nicht umgesetzt werden, wäre eine Näherungslösung denkbar, die dem Strömungsmodell ähnlich in einer Vorabsimulation ermittelt wird.

Für die Lösung der Modellgleichungen konnte auf bereits implementierte numerische Verfahren in der verwendeten Simulationssoftware zurückgegriffen werden. Eine Ausnahme bestand bei der Abbildung der zeitabhängigen Partikelaufladung. Hierfür gab es zunächst keine Funktionalität innerhalb des Simulationstools. Im Rahmen der Arbeit wurde ein geeignetes Modell recherchiert und in Zusammenarbeit mit dem Hersteller der Software implementiert. Zukünftige Programmversionen beinhalten dieses Modell.

Das Ziel der Arbeit, die automobiler Decklackierkabine ganzheitlich simulativ abzubilden, wurde mit der entwickelten Methode erreicht. Auch der elektrostatisch unterstützte Lackiervorgang, welcher die physikalisch anspruchsvollste Prozessvariante darstellt, wurde in die Methode eingeschlossen. Die Simulationsergebnisse zeigen vor allem für die Lackierung ohne Hochspannung eine sehr gute Übereinstimmung mit Messergebnissen. Die Zusammenarbeit mit dem Produktionsprozess Lackierung zeigt, dass die Simulationmethode im industriellen Umfeld sinnvoll zum Einsatz gebracht werden kann.

9

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst sowie Vorschläge für eine Weiterentwicklung der Methode skizziert.

9.1 ZUSAMMENFASSUNG

Immer kürzer werdende Produktentwicklungsprozesse machen eine computerunterstützte Produkt- und Prozessentwicklung erforderlich. Die Bedeutung von digitalen Methoden, wie sie in den Konzepten der Digitalen Fabrik verankert sind, gewinnen zunehmend an Bedeutung, um eine wirtschaftliche und effiziente Entwicklung und Produktion sicherstellen zu können. Für die Prozessschritte der kathodischen-Tauchlackierung und des Trocknerdurchlaufs gibt es qualifizierte Simulationsmethoden, die bereits in der Prozessabsicherung zum Einsatz kommen. Eine Lücke besteht für den Schritt der Decklackierung, der auf Grund seiner Komplexität bisher noch nicht gesamtheitlich simulationstechnisch abgebildet ist.

In dieser Arbeit wird erstmalig die numerische Simulation einer automobilen Decklackierkabine vorgestellt. Ziel dabei ist es einerseits, zum generellen Prozessverständnis beizutragen, das besonders durch die vielen beteiligten Teilprozesse erschwert wird. Andererseits wird im Rahmen der Digitalen Fabrik ein Werkzeug erstellt, mit dem sowohl die Entwicklungs-, die Planungs- als auch die Produktionsprozesse in einer frühen Phase unterstützt werden können. Der Lackierprozess kann bereits mit den ersten Geometriedaten in der Designphase virtuell aufgesetzt und simuliert werden. Zudem können schon bestehende Prozesse analysiert und optimiert sowie bei Einführung neuer

Baureihen angepasst werden. In Zusammenarbeit mit Prozessverantwortlichen der Lackierung befindet sich die Methode bereits im Einsatz. Die simulierten Schichtdickenergebnisse werden genutzt, um Mängel im Prozess frühzeitig erkennen zu können und Lösungsansätze zu erarbeiten.

Bereits existierende Ansätze zur Simulation des Decklackierprozesses sind durch den hohen Bedarf an Rechenleistung restringiert, sodass sie sich auf stationäre Zerstäuber oder einfache Geometrien beschränken. Ziel dieser Arbeit war es, diese limitierenden Faktoren zu umgehen und die ganzheitliche digitale Abbildung einer Lackierkabine samt Rohbaukarosserie umzusetzen. Um den Prozess unter einem sinnvollen Rechenaufwand simulieren zu können, wird die Simulationsmethode in drei Abschnitte von stets zunehmender Komplexität gegliedert. Die Entwicklung der Methode wird am Beispiel der Außenlackierung mit Wasserbasislack vorgestellt, da diese den physikalisch anspruchsvollsten Schritt der Decklackierung darstellt.

Zunächst wird in Kapitel 4 das Strömungsfeld der Lenkluft betrachtet, das den Zerstäuber umgibt. Diese Vorgehensweise begründet sich auf der Idee, die hohe Dynamik der Lenkluft in einem ersten Schritt detailliert abzubilden und dabei Daten zu generieren, die als Eingangsgröße für die folgenden Simulationsschritte dienen. Dadurch kann die Detailbetrachtung der Lenkluftausströmung im nächsten Schritt der Simulationsmethode entfallen und Rechenzeit eingespart werden. Zur Berechnung des Strömungsfelds werden zwei Simulationsansätze entwickelt und gegenübergestellt: das Segmentmodell und das Vollmodell. Das Vollmodell umfasst den Hochrotationszerstäuber sowie einen Strömungswiderstand in Form einer Platte, die sich im Lackierabstand zum Zerstäuber befindet. Das Vollmodell entspricht also näherungsweise einem Ausschnitt aus dem vollständigen Lackierprozess. Im Segmentmodell wird, wie der Name besagt, die Rotationssymmetrie ausgenutzt und nur ein Segment des Zerstäubers mit entsprechenden Symmetrie-Randbedingungen modelliert. Außerdem wird eine sich frei ausbildende Strömung ohne eingebrachten Strömungswiderstand erlaubt. Die Gegenüberstellung der Modelle erfolgt anhand von berechneten Strömungs- und Druckfeldern.

In Kapitel 5 wird der Aufbau eines Technikumsversuchs und in Kapitel 6 dessen digitale Abbildung beschrieben. In dem Versuch werden ebene Bleche

unter prozessnahen Bedingungen beschichtet und die resultierende Schichtdicke vermessen. Im Abgleich mit den im Versuch gewonnenen Informationen kann das Simulationsmodell validiert werden. Dies wird für drei verschiedene Brushkonfigurationen sowohl mit als auch ohne Hochspannung durchgeführt. Die Bewertung erfolgt anhand von Schichtdickenverteilungen, Profilschnitten und Auftragswirkungsgraden.

In Kapitel 7 werden im letzten Schritt die zuvor gewonnenen Informationen zusammengeführt und die Simulation der Decklackierkabine aufgebaut. Sie bildet die Abläufe der realen Decklackierung einer Rohbaukarosserie in umfassender Weise ab. Die Prozesseinstellungen aus der Lackierplanung wie Roboterpfade, Schaltzeitpunkte und Brusheinstellungen werden implementiert. Um das skalenübergreifende Modell effizient berechnen zu können, wird eine Vernetzungsstrategie vorgestellt, die gewährleistet, dass nur die relevanten Bereiche die benötigte Auflösung besitzen, die Berechnung des übrigen Rechengebiets jedoch nicht unnötig viel Rechenzeit beansprucht. Mit Hilfe der simulierten Schichtdickenverteilungen auf der Fahrzeugoberfläche werden Sollschichtdicken untersucht sowie Bereiche mit Unter- oder Überbeschichtung identifiziert. Durch die Möglichkeit einer detaillierten Prozessanalyse anhand der Strömungsfelder und Spannungsverteilungen können Rückschlüsse auf die Ursachen dieser Defekte geschlossen werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde erfolgreich eine Methode zur numerischen Simulation des automobilen Decklackierprozesses entwickelt. Die Berechnungsergebnisse des Anwendungsfalls mit Hochspannung zeigen eine gute, des Anwendungsfalls ohne Hochspannung sogar eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Mit Hilfe der Simulationsergebnisse kann der Prozess frühzeitig bewertet und gegebenenfalls korrigiert werden.

9.2 AUSBLICK

Die Simulation von Lackierprozessen wird mit dieser Arbeit auf die Abbildung einer gesamten Decklackierkabine erweitert. Der Grund, aus dem sich bisherige Ansätze auf einzelne Bauteile oder Phänomene beschränken, liegt vor allem im hohen Rechenbedarf der Fragestellung. Zur Berechnung der vollständigen La-

ckierkabine wird nach derzeitigem Stand ein High-Performance-Rechencluster benötigt. Die Ergebnisse ohne Hochspannung weisen bereits eine sehr gute Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen auf, was die grundsätzliche Qualität der Methode bestätigt. Verbesserungspotential gibt es bei der Berechnung des Prozesses mit Hochspannung und zeitabhängiger Partikelaufladung. Für diesen Anwendungsfall wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Modell implementiert, das eine konstante Ionenverteilung im Raum annimmt. Diese Vereinfachung wurde getroffen, um die Methode schlank zu halten und den Rechenbedarf nicht weiter in die Höhe zu treiben. Für eine Verbesserung der Simulationsergebnisse sollte dieser Aspekt angepasst werden. In einem ersten Schritt wäre eine Verteilungsfunktion denkbar, die eine stationäre Nährungslösung an die Iondichte im Raum angibt. Soll die tatsächliche Ionendichte zu jedem Zeitpunkt der Simulation berechnet werden, muss ein zusätzliches Gleichungssystem gelöst werden, was auf Grund der Netzgröße einen deutlichen Mehraufwand bedeutet.

Für die Größenverteilungen der Lacktropfen werden in der Berechnung gemessene Tropfenspektren verwendet. Es zeigt sich, dass dies eine wichtige Eingangsgröße ist, die die Qualität der Simulationsergebnisse beeinflusst. Momentan ist die Simulationsmethode auf diese Messungen angewiesen. Die entsprechende Tropfengrößenverteilung für jede Brushkonfiguration zu ermitteln, bedeutet jedoch einen hohen Versuchsaufwand. Als Weiterentwicklung wäre es denkbar, aus nur wenigen gemessenen Tropfengrößenverteilungen Metamodelle zu entwickeln, um daraus die Spektren für beliebige Brushkonfigurationen abzuleiten.

Soll die Simulationsmethode unabhängig von Messgrößen als Eingangsgröße sein, müsste eine Methode entwickelt werden, die den Zerstäubungsvorgang selbst berechnet. Bisher gibt es jedoch noch keine zuverlässige digitale Abbildung dieses Vorgangs, da sich die Modellierung unter anderem durch die Notwendigkeit einer hochauflösenden Vernetzung sehr schwierig gestaltet.

In der bisherigen Modellierung kann die Gefahr von Lackläufern über einen Abgleich mit Sollsichtdicken erkannt werden. Wird diese Schichtdicke überschritten, besteht das Risiko, dass es zu Läuferten oder im anschließenden Trocknungsprozess zu Kochern kommen kann. Die Lackschicht wird in

der Berechnung als skalare Größe modelliert. Zur Ermittlung der trockenen Schichthöhe wird die simulierte feuchte Lackschicht mit dem Festkörperanteil des Lacks multipliziert. Dieses Vorgehen erzielt eine gute Übereinstimmung mit gemessenen Schichtdickenverteilungen. Eine Dynamik im Film, wie beispielsweise ein Verlaufen des noch flüssigen Lacks oder das Abdampfen der flüchtigen Komponenten kann jedoch nicht abgebildet werden. Um diese Fragestellungen ebenfalls im Detail untersuchen zu können, müsste die Lackschicht als Fluidfilm modelliert werden. Das Fluidfilm-Modell steigert den Vernetzungs- und Rechenaufwand.

Für den Praxiseinsatz ist es vor allem entscheidend, dass Simulationsergebnisse innerhalb kurzer Zeit generiert werden können, damit schnell auf etwaige Probleme reagiert werden kann. Bei einer Weiterentwicklung der Methode ist deshalb besonders eine Reduktion der Rechenzeit erstrebenswert. Eine Unterstützung der Prozessplanung beispielsweise bei der Korrektur von Roboterpfaden bei der Übernahme aus Vorgängerbaureihen ist weniger zeitkritisch, da lediglich Oberflächengeometriedaten für die Modellierung benötigt werden und der Prozess frühzeitig untersucht werden kann. Anders verhält es sich bei Problemen, die während der Produktion auftreten und bei denen die Unterstützung der Lackierprozess-Simulation angefordert wird. In diesem Fall muss schnell auf Simulationsergebnisse zurückgegriffen werden können, so dass es sinnvoll ist, Teilmodelle zu verwenden. Wird bei der Qualitätskontrolle beispielsweise ein kritischer Bereich an der Motorhaube lokalisiert, könnte in einem ersten Schritt eine Berechnung durchgeführt werden, bei der lediglich die Zerstäuber aktiviert sind, von denen die Motorhaube unmittelbar betroffen ist.

Zur Reduktion der Rechenzeit wäre es außerdem denkbar, ein weiteres Interface in Entfernung vom Zerstäuber einzusetzen. Durch ein geeignetes Modell für Luftströmung, Spannungs- und Tropfenverteilung könnten die fein vernetzten Bereiche in Zerstäubernähe ersetzt werden ähnlich dem Prinzip, das bei der Berechnung des Strömungsfelds verfolgt wird. Dadurch dass bis zu vier Zerstäuber gleichzeitig lackieren und jeder von dieser Reduktion profitieren würde, ergibt sich ein deutliches Einsparpotential.

Bisher wurden die einzelnen Schritte der Innen- und Außenlackierung nur isoliert betrachtet. Die vorgestellte Simulationsmethode kann ohne Probleme an bestehende Methoden zur Betrachtung anderer Lackierprozessschritte, wie beispielsweise die der KTL-Simulation, anknüpfen. Dazu wäre es sinnvoll, die simulierten Schichtdickenverteilungen der Innen-, Außen- und Klarlacklackierung zusammenzuführen und damit den gesamten Decklackiervorgang digital abzubilden.

LITERATURVERZEICHNIS

ADAMIAK und ATTEN 2004

K. ADAMIAK und P. ATTEN. „Simulation of Corona Discharge in Point–Plane Configuration“. In: *Journal of Electrostatics* 61.2 (2004), S. 85–98.

ADAMIAK und ZHAO 2005

K. ADAMIAK und L. ZHAO. „Effects of EHD and external air flows on electric corona discharge in pin–plate configuration“. In: *Industry Applications Conference, 2005*. Bd. 4. 2005, S. 2584–2589.

ALBIEZ 2016

C. ALBIEZ. „Simulationsgestützte Analysemethodik zur Untersuchung von thermomechanischen Bauteildeformationen von Fahrzeugkaros-serien im Lacktrocknungsprozess“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2016.

ANG 1981

M. L. ANG. „Trajectories of Charged Particles in Electrostatic Powder Coating Systems“. Dissertation. Loughborough University of Technology, 1981.

ANG und LLOYD 1987

M. L. ANG und P. J. LLOYD. „Investigation of charged particle trajectories in electrostatic powder coating systems“. In: *International Journal of Multiphase Flow* 13.6 (1987), S. 823–836.

BANABIC 2010

D. BANABIC. *Sheet metal forming processes: Constitutive modelling and numerical simulation*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.

BARBOSA-CÁNOVAS und VEGA-MERCADO 1996

G. V. BARBOSA-CÁNOVAS und H. VEGA-MERCADO. *Dehydration of Foods*. Boston, MA: Springer US, 1996.

BMW 2011

BMW. „Entscheidung für füllerlos“. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* 51.3 (2011), S. 14–17.

BÖTTNER 2002

C.U. BÖTTNER. „Über den Einfluss der elektrostatischen Feldkraft auf turbulente Zweiphasenströmungen: numerische Modellierung mit der Euler-Lagrange-Methode“. Dissertation. Halle-Wittenberg: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2002.

BRACHT, GECKLER und WENZEL 2011

U. BRACHT, D. GECKLER und S. WENZEL. *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele*. VDI-Buch. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.

BRACHT und RITZ 2016

U. BRACHT und V. RITZ. „Digitale Absicherung einer Decklackierkabine: Methodenentwicklung und numerische Simulation“. In: *Werkstattstechnik online* 106.5 (2016), S. 364–369.

CROWE, SOMMERFELD und TSUJI 1998

C. T. CROWE, M. SOMMERFELD und Y. TSUJI. *Multiphase flows with droplets and particles*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1998.

DIN EN 13966-1:2003-09 2003

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *Bestimmung des Auftragswirkungsgrades von Spritz- und Sprühgeräten für Beschichtungsstoffe*. Berlin: Beuth Verlag, 2003.

DIN EN 3233-2:2014-10 2014

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *Beschichtungsstoffe – Bestimmung des Volumens nichtflüchtiger Anteile – Teil 2: Verfahren mit Bestimmung des Gehaltes an nichtflüchtigen Anteilen nach ISO 3251 und Bestimmung der Trockenfilmdichte beschichteter Probenplatten nach dem Archimedes-Prinzip*. Berlin: Beuth Verlag, 2014.

DIN EN ISO 2178:2016-11 2016

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *Nichtmagnetische Überzüge auf magnetischen Grundmetallen – Messen der Schichtdicke – Magnetverfahren*. Berlin: Beuth Verlag, 2016.

DIN EN ISO 3251:2008-06 2008

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *Beschichtungsstoffe und Kunststoffe – Bestimmung des Gehaltes an nichtflüchtigen Anteilen*. Berlin: Beuth Verlag, 2008.

DOMNICK, SCHEIBE und YE 2006

J. DOMNICK, A. SCHEIBE und Q. YE. „The Simulation of Electrostatic Spray Painting Process with High-Speed Rotary Bell Atomizers. Part II: External Charging“. In: *Particle & Particle Systems Characterization* 23.5 (2006), S. 408–416.

DOMNICK, SCHEIBE und YE 2005

J. DOMNICK, A. SCHEIBE und Q. YE. „The Simulation of the Electrostatic Spray Painting Process with High-Speed Rotary Bell Atomizers. Part I: Direct Charging“. In: *Particle & Particle Systems Characterization* 22.2 (2005), S. 141–150.

DOMNICK, YANG und YE 2008

J. DOMNICK, Z. YANG und Q. YE. „Simulation of the film formation at a high-speed rotary bell atomizer used in automotive spray painting processes“. In: *ILASS 2008, 22nd European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Proceedings*. Como: Institute for Liquid Atomization and Spray Systems -ILASS- Europe, 2008, S. 6.

DÖSSEL 2006

K.F. DÖSSEL. „Füllerlose Automobil-Lackierung auf dem Vormarsch“. In: *Journal für Oberflächentechnik* 46.9 (2006), S. 40–45.

ECKERT 2012

A. ECKERT. „Prognose der Maßhaltigkeit punktförmig mechanisch gefügter Karosserieanbauteile“. Dissertation. Chemnitz: TU Chemnitz, 2012.

ELLWOOD und BRASLAW 1998

K. R.J. ELLWOOD und J. BRASLAW. „A finite-element model for an electrostatic bell sprayer“. In: *Journal of Electrostatics* 45.1 (1998), S. 1–23.

FERZIGER und PERIĆ 2008

J. H. FERZIGER und M. PERIĆ. *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.

ISO 13320:2009-12 2009

INTERNATIONALE ORGANISATION FÜR NORMUNG. *Particle size analysis – Laser diffraction methods*, 2009.

ISO 8778:2003-03 2003

INTERNATIONALE ORGANISATION FÜR NORMUNG. *Pneumatic Fluid Power – Standard Reference Atmosphere*, 2003.

KÄSTLE 2016

C. KÄSTLE. „Simulationsmethode zur Beurteilung der Maßhaltigkeit von rollgefalzten Karosseriebaugruppen im Zusammenbau“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2016.

KÜCHLER 2005

A. KÜCHLER. *Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie – Anwendungen*. 2., vollst. bearb. und erw. Aufl. VDI-Buch. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.

KURZ 2006

O. KURZ. „Virtuelle Fertigungsprozessabsicherung und -optimierung: Einsatzpotentiale numerischer Berechnungsmethoden im Rahmen der digitalen Fabrik“. Dissertation. Clausthal: TU Clausthal, 2006.

LANGE 2003

K. LANGE. „Moderne Umformtechnik für die industrielle Produktion“. In: *Marktchance Individualisierung*. Hrsg. von G. REINHART und M. F. ZÄH. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2003, S. 263–276.

LANGE, ROLL, TEKKAYA und WANHEIM 1993

K. LANGE, K. ROLL, A. E. TEKKAYA und T. WANHEIM. „Prozeßsimulation und-optimierung“. In: *Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. Hrsg. von K. LANGE. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1993, S. 306–435.

LAURIEN und OERTEL JR. 2013

E. LAURIEN und H. OERTEL JR. *Numerische Strömungsmechanik: Grundgleichungen und Modelle – Lösungsmethoden – Qualität und Genauigkeit*. 5., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.

MARK, ANDERSSON, TAFURI, ENGSTROM, SOROD, EDELVIK und CARLSON 2013

A. MARK, B. ANDERSSON, S. TAFURI, K. ENGSTROM, H. SOROD, F. EDELVIK und J. S. CARLSON. „Simulation of Electrostatic Rotary Bell Spray Painting in Automotive Paint Shops“. In: *Atomization and Sprays* 23.1 (2013), S. 25–45.

MARK, RUNDQVIST und EDELVIK 2011

A. MARK, R. RUNDQVIST und F. EDELVIK. „Comparison Between Different Immersed Boundary Conditions for Simulation of Complex Fluid Flows“. In: *Fluid Dynamics & Materials Processing* 7.3 (2011).

MARK und VAN WACHEM 2008

A. MARK und B. G.M. VAN WACHEM. „Derivation and validation of a novel implicit second-order accurate immersed boundary method“. In: *Journal of Computational Physics* 227.13 (2008), S. 6660–6680.

MIERDEL und SEELIGER 1935

G. MIERDEL und R. SEELIGER. „Untersuchungen über die physikalischen Vorgänge bei der Elektrofilterung“. In: *Archiv für Elektrotechnik* 29.3 (1935), S. 149–172.

MINKO 2010

P. MINKO. „Mit einer Lackschicht weniger zum Ziel“. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* 50.9 (2010), S. 36–38.

MINSKY 1965

M. MINSKY. *Matter, Mind and Models*. 1965.

PAUTHENIER und MOREAU-HANOT 1932

M. PAUTHENIER und M. MOREAU-HANOT. „La Charge des Particules Sphériques dans un Champ ionisé“. In: *J. Phys. Radium* 3.12 (1932), S. 590–613.

PERRET 2013

W. PERRET. „Welding simulation of complex automotive welded assembly: Possibilities and limits of the application of analytical temperature field solutions“. Dissertation. Berlin: TU Berlin, 2013.

POPPNER 2007

M. POPPNER. „Modellierung und Simulation der Lackierung von PKW-Karosserien mit bewegten, elektrostatisch unterstützten Hochrotationszerstäubern“. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt, 2007.

RAYLEIGH 1882

RAYLEIGH. „On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity“. In: *Philosophical Magazine Series 5* 14.87 (1882), S. 184–186.

ROHLEDER 2002

M. ROHLEDER. „Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen im Produktentstehungsprozess von Blechformteilen“. Dissertation. Dortmund: TU Dortmund, 2002.

ROLL, LEMKE und WIEGAND 2005

K. ROLL, T. LEMKE und K. WIEGAND. „Possibilities and Strategies for Simulations and Compensation for Springback“. In: *AIP Conference Proceedings*. AIP, 2005, S. 295–302.

ROLL und TEKKAYA 1985

K. ROLL und A. E. TEKKAYA. „Prozeßsimulation in der Umformtechnik mit der Methode der Finiten Elemente: Stand und Entwicklungstendenzen – Teil I“. In: *Blech Rohre Profile* 32.6 (1985), S. 284–289.

ROLL und TEKKAYA 1985

K. ROLL und A. E. TEKKAYA. „Prozeßsimulation in der Umformtechnik mit der Methode der Finiten Elemente: Stand und Entwicklungstendenzen – Teil II“. In: *Blech Rohre Profile* 32.7 (1985).

ROLLER 2012

S. ROLLER. „Integrierte Lackierprozess-Simulation an virtuellen Fahrzeug-prototypen in der Digitalen Fabrik“. Dissertation. Clausthal: TU Clausthal, 2012.

RUNDQVIST, MARK, ANDERSSON, ÅLUND, EDELVIK, TAFURI und CARLSON 2010

R. RUNDQVIST, A. MARK, B. ANDERSSON, A. ÅLUND, F. EDELVIK, S. TAFURI und J. S. CARLSON. „Simulation of Spray Painting in Automotive Industry“. In: *Numerical Mathematics and Advanced Applications 2009*. Hrsg. von Gunilla KREISS, Per LÖTSTEDT, Axel MÅLQVIST und Maya NEYTCHIEVA. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, S. 771–779.

SCHMIDT-JÜRGENSEN 2003

R. SCHMIDT-JÜRGENSEN. „Untersuchungen zur Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen beim Tiefziehen“. Dissertation. Hannover: Universität Hannover, 2003.

SCHWENK 2007

C. SCHWENK. „FE-Simulation des Schweißverzugs laserstrahlgeschweißter dünner Bleche: Sensitivitätsanalyse durch Variation der Werkstoffkennwerte“. Dissertation. Berlin: TU Berlin, 2007.

TOLJIC, ADAMIAK, CASTLE, KUO und FAN 2012

N. TOLJIC, K. ADAMIAK, G. CASTLE, H. KUO und H. FAN. „3D numerical model of the electrostatic coating process with moving objects using a moving mesh“. In: *Journal of Electrostatics* 70.6 (2012), S. 499–504.

TOLJIC, ADAMIAK, CASTLE, KUO und FAN 2013

N. TOLJIC, K. ADAMIAK, G. CASTLE, H. KUO und H. FAN. „A full 3D numerical model of the industrial electrostatic coating process for moving targets“. In: *Journal of Electrostatics* 71.3 (2013), S. 299–304.

VDI 3455:2013-08 2013

VDI. *Emissionsminderung – Anlagen zur Serienlackierung von Automobilkarosserien*. Berlin: Beuth Verlag, 2013.

VDI 4499 Blatt 1:2008-02 2008

VDI. *Digitale Fabrik – Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag, 2008.

VERSTEEG und MALALASEKERA 2007

H. K. VERSTEEG und W. MALALASEKERA. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. 2. ed., [Nachdr.] Harlow: Pearson/Prentice Hall, 2007.

WENDT und ANDERSON 2009

J. F. WENDT und J. D. ANDERSON. *Computational Fluid Dynamics - An introduction: With contributions by John D. Anderson*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.

WESTKÄMPER, SPATH, CONSTANTINESCU und LENTES 2013

E. WESTKÄMPER, D. SPATH, C. CONSTANTINESCU und J. LENTES. *Digitale Produktion*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.

WOZNIAK 2003

G. WOZNIAK. *Zerstäubungstechnik: Prinzipien, Verfahren, Geräte*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2003.

YE 2006

Q. YE. „Using Dynamic Mesh Models to Simulate Electrostatic Spray-Painting“. In: *High Performance Computing in Science and Engineering' 05*. Hrsg. von W. E. NAGEL, M. RESCH und W. JÄGER. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, S. 173–183.

YE und DOMNICK 2003

Q. YE und J. DOMNICK. „On the simulation of space charge in electrostatic powder coating with a corona spray gun“. In: *Powder Technology* 135–136 (2003), S. 250–260.

YE, STEIGLEDER, SCHEIBE und DOMNICK 2002

Q. YE, T. STEIGLEDER, A. SCHEIBE und J. DOMNICK. „Numerical simulation of the electrostatic powder coating process with a corona spray gun“. In: *Journal of Electrostatics* 54.2 (2002), S. 189–205.

ZHANG und ADAMIAK 2008

J. ZHANG und K. ADAMIAK. „A Single-Species Pulsed Model of Negative Corona Discharge in Air“. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 44.2 (2008), S. 494–500.

ZHAO und ADAMIAK 2005

L. ZHAO und K. ADAMIAK. „EHD Flow in Air Produced by Electric Corona Discharge in Pin–Plate Configuration“. In: *Journal of Electrostatics* 63.3–4 (2005), S. 337–350.

LEBENS LAUF

PERSÖNLICHE INFORMATIONEN

Name Verena Ritz
Geburtsdatum 28.08.1985
Geburtsort Bocholt



SCHULBILDUNG UND STUDIUM

1992–1996 Liebfrauengrundschule in Bocholt
1996–2005 St.-Josef-Gymnasium in Bocholt
2005–2011 Studium an der RWTH Aachen in der Fachrichtung
Computational Engineering Science

BERUFLICHE UND PRAKTISCHE TÄTIGKEITEN

2007 Studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Mathematik der RWTH
Aachen (Center for Computational Engineering Science)
2008–2010 Studentische Hilfskraft am Institut für Getriebetechnik und
Maschinendynamik der RWTH Aachen
2010–2011 Praktikum bei der Daimler AG in Sindelfingen
2011 Diplomarbeit bei der Daimler AG in Sindelfingen
2011–2013 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Bildsamer
Formgebung der RWTH Aachen
2013–2016 Doktorandin bei der Daimler AG in Sindelfingen
seit 2016 Anstellung als Versuchsingenieurin bei der Daimler AG in
Sindelfingen